



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità
A.A 2024/2025

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettare la riqualificazione degli edifici:
strategie resilienti
ai cambiamenti climatici**

Candidata:

Gaia Rosa Vidotto
S328970

Relatrice:

Prof.ssa Ilaria Ballarini

Correlatrici:

Mamak Pourabdollahtootkaboni
Giovanna De Luca
Alice Gorrino

Dicembre 2025

A mia sorella **Azzurra**,
mia anima gemella,
fonte di luce, sicerità, simpatia e amore infinito.

Al mio papà **Pier Giorgio**,
pilastro portante della mia vita,
presenza elegante e di esempio per ogni mio passo.

Alla mia mamma **Anna Gelsa**,
per averci insegnato l'arte di sorridere sempre:
nonostante tutto, nonostante tutti.

Dichiarazione sull'utilizzo di strumenti di assistenza digitale:

Dichiaro che, durante la redazione della presente tesi magistrale, ho fatto uso dello strumento di intelligenza artificiale ChatGPT esclusivamente per supporto linguistico, in particolare per riformulare e rendere più scorrevoli alcuni passaggi del testo.

Le attività di analisi, ricerca, modellazione, interpretazione dei risultati e ogni contenuto scientifico e progettuale qui presentato sono frutto del mio lavoro originale.

INDICE

ABSTRACT	01
INTRODUZIONE	03
01. QUADRO NORMATIVO	07
1.1 Politiche di decarbonizzazione	08
1.2 La resilienza ai cambiamenti climatici come paradigma progettuale	11
1.1.1 Mitigazione	12
1.1.2 Adattamento	14
1.3 Tassonomia dell'Unione Europea	16
1.3.1 Report di sostenibilità	18
1.3.2 Il principio DNSH	22
1.3.2.1 CAM e Appalti Pubblici	24
1.4 Certificare la sostenibilità	27
1.4.1 Indicatori di sostenibilità <i>Level(s)</i>	27
1.4.2 Protocolli di sostenibilità	30
02. GENERAZIONE DI DATI CLIMATICI FUTURI	35
2.1 Scenari di emissione di CO ₂	35
2.2 Modelli climatici globali	39
2.3 Modelli climatici regionali	41
2.3.1 <i>Statistical Downscaling</i>	41
2.3.1.1 Metodo Stocastico	42
2.3.1.2 Metodo <i>Morphing</i>	44
2.3.2 <i>Dynamical Downscaling</i>	47
2.3.3 <i>Downscaling</i> ibrido	48
03. METODOLOGIA DI ANALISI	53
3.1 Raccolta dati e modello allo stato di fatto	55
3.2 Stato di progetto	55
3.2.1 Indicatori di prestazione e metodi di calcolo	57
3.2.2 Generazione dei dati climatici futuri	59
3.3 Strategie di intervento resilienti ai cambiamenti climatici	61

04. CASO STUDIO65

4.1 Modello dello stato di fatto	65
4.1.1 Involucro	67
4.1.2 Impianti	72
4.2 Modello dello stato di progetto	72
4.2.1 Involucro	73
4.2.2 Impianti	74
4.3 Specifiche di modellazione delle strategie resilienti	74
4.3.1 Schermature solari	75
4.3.2 Superfici ad alta riflettanza solare	76
4.3.3 <i>Ventilative Cooling</i>	77
4.3.4 Strategie combinate	79

05. RISULTATI81

5.1 Indicatori relativi al fabbricato	82
5.2 Indicatori relativi al sistema edificio - impianto	86

CONCLUSIONI99

BIBLIOGRAFIA103

RINGRAZIAMENTI107

ABSTRACT

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più rilevanti a livello globale, con ripercussioni significative sul settore edilizio, responsabile di una quota sostanziale dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti. In questo contesto, lo studio dei dati climatici e degli scenari emissivi futuri risulta fondamentale per valutare il comportamento energetico, e migliorare le loro capacità di **adattamento** ai cambiamenti climatici e **mitigazione** degli stessi. La presente tesi di laurea approfondisce queste tematiche attraverso l'analisi della prestazione di un edificio ad uso uffici preso come caso studio, applicando dati climatici futuri per il 2050 e 2090, generati sulla base dello scenario di emissione RCP 8.5 dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Attraverso la modellazione dinamica oraria con il software EC700, viene sviluppato un modello dello stato di fatto del fabbricato ed in seguito un modello di riferimento aggiornato dello stato di progetto e assunto come nuovo punto di partenza, su cui applicare strategie di riqualificazione resilienti ai cambiamenti climatici. In particolare, vengono analizzate tre misure chiave per il raffrescamento: schermature solari avanzate, superfici ad alta riflettanza solare ed il **ventilative cooling**. L'efficacia di tali interventi è valutata: i) rispetto all'involucro edilizio, in termini di contenimento del fabbisogno di raffrescamento; ii) rispetto all'impianto termico, tramite la riduzione della richiesta di energia primaria; iii) rispetto al benessere termo-igrometrico per gli occupanti, attraverso la riduzione delle ore di discomfort; iv) rispetto all'ambiente, mediante la stima delle emissioni di CO₂ evitate.

I risultati evidenziano un incremento marcato della domanda di raffrescamento per lo stato di progetto al crescere dell'orizzonte temporale rispetto all'anno di riferimento 2010. Al 2050, le strategie di raffrescamento resiliente esaminate consentono una moderata riduzione dei fabbisogni, soprattutto con il modello integrato, comprendente tutti gli interventi, che risulta l'unico a raggiungere l'obiettivo di resilienza, ossia con un fabbisogno inferiore rispetto allo stato di progetto all'anno 2010. Al 2090, invece, l'intensificazione dell'aumento della temperatura media esterna limita fortemente l'efficacia di tutte le misure: né singolarmente né combinate esse risultano in grado di ridurre in modo significativo la domanda di energia primaria per il raffrescamento.

Nel complesso, lo studio mette in evidenza come la resilienza climatica degli edifici richieda un approccio progettuale evolutivo, basato sull'integrazione sinergica tra qualità dell'involucro, strategie passive avanzate e sistemi impiantistici adeguati agli scenari futuri. L'analisi condotta sottolinea la necessità di ripensare i criteri prestazionali oggi in vigore, introducendo metodologie di progettazione capaci di garantire non solo efficienza attuale, ma anche robustezza e adattabilità nel lungo periodo.

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni il tema del cambiamento climatico è emerso con crescente urgenza, trasformandosi da questione prettamente scientifica ad essere un elemento centrale nelle politiche ambientali, economiche e sociali a livello globale. Nonostante gli avvertimenti lanciati già da decenni dalla comunità scientifica circa la necessità di interventi tempestivi e coordinati, il tema è stato a lungo marginalizzato nel dibattito politico, ricevendo un'attenzione inadeguata rispetto alla sua gravità e portata.

Le più recenti pubblicazioni dell' *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ed in particolare il rapporto, noto come *Special Report on Global Warming of 1.5 °C* (SR15) [0], del 2018, mostrano infatti come le attività antropiche abbiano causato un innalzamento delle temperature globali compreso tra gli 0,8 °C e i 1,2 °C rispetto ai livelli preindustriali e come questo valore sia in previsione di aumentare ulteriormente fino ad arrivare a 1,5 ° tra il 2030 ed il 2050. Viene inoltre messo l'accento su come, in relazione a questo fenomeno di surriscaldamento, siano aumentate la frequenza e l'intensità di eventi

meteorologici e climatici catastrofici ed estremi come ondate di calore, alluvioni e nevicate eccezionali.

In riferimento alle attività antropiche la costruzione e la gestione degli edifici risultano essere tra le principali responsabili delle emissioni di gas serra, rappresentando il 36% delle emissioni di CO₂ equivalente nell'Unione Europea, il 43% negli Stati Uniti e oltre il 50% in Cina; gli edifici sono quindi gli autori del 40% del consumo energetico complessivo dell'Unione Europea [1]. In linea di massima, nei paesi sviluppati, circa la metà dell'energia prodotta viene utilizzata per soddisfare il fabbisogno degli edifici per il riscaldamento, raffrescamento e ventilazione meccanica controllata; quando si considera invece il carbonio incorporato nei materiali da costruzione, negli interni, negli impianti e nelle infrastrutture associate, si può constatare come solo tre materiali: calcestruzzo, acciaio e alluminio sono responsabili del 23% delle emissioni globali di anidride carbonica e gas clima alteranti totali e la maggior parte di questi materiali viene utilizzata nel settore edile.

La trattazione dell'elaborato

[0] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Global warming of 1.5°C: *An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*, (2018).

[1] Efficienza energetica nell'edilizia, Commissione Europea – Dipartimento energia, Bruxelles, 17 febbraio.

di tesi prende avvio dallo studio del contesto in cui il settore delle costruzioni deve evolversi e svilupparsi, cercando di spingersi verso approcci più sostenibili e resilienti che tengano conto delle variabili e delle proiezioni climatiche in forte cambiamento. L'ambiente costruito deve quindi adattarsi ad un clima in rapida evoluzione, cercando di mitigare gli impatti: per fare questo le simulazioni energetiche sono fondamentali per uno studio approfondito del comportamento degli edifici nel futuro ma hanno bisogno di essere sostenute da file di dati climatici futuri aggiornati ed attendibili. Le variabili climatiche ed atmosferiche sono alla base delle relazioni tra involucro, impianti, sistemi passivi, e sistemi meccanici, ma quelle utilizzate attualmente si basano su registrazioni storiche che non tengono conto delle condizioni e degli scenari climatici.

Per approfondire il tema dell'utilizzo di dati climatici futuri viene fatta un'analisi dei settori e possibili ambiti di applicazione per cui questa tipologia di dato diventa utile e proseguendo viene elaborata una ricerca sullo stato dell'arte delle modalità di generazione di questi dati specifici e delle proiezioni future, discutendo le metodologie più diffuse, i modelli di simulazione ed i diversi scenari di emissione, elaborando un'analisi critica della letteratura esistente.

Lo scopo principale del presente elaborato è quello di

analizzare l'importanza e l'influenza dei dati climatici nell'elaborazione di valutazioni energetiche proiettate verso scenari futuri, con particolare attenzione all'adattamento del patrimonio edilizio ai cambiamenti climatici in atto. L'indagine si concentra su come le condizioni climatiche influenzino sia l'involucro edilizio sia i sistemi impiantistici che il **comfort** degli occupanti, evidenziando la necessità di strategie progettuali e tecnologiche capaci di garantire prestazioni energetiche resilienti nel lungo periodo.

A supporto dell'analisi è stato scelto un caso studio reale: la sede principale dell'azienda Edilclima S.r.l., situata a Borgomanero (NO), in via Antonio Vivaldi 7: l'edificio è stato modellato a partire dallo stato di fatto, per poi essere oggetto di una simulazione di ristrutturazione ed in seguito sono state applicate tre diverse strategie per controllare i crescenti fabbisogni di energia per il raffrescamento. Su tutti i modelli sono stati applicati diversi scenari climatici al 2010, 2050 e 2090, realizzati prendendo in considerazione lo scenario di emissione RCP 8.5, ed estrapolati dal progetto **Annex 80** [2], progetto di ricerca internazionale che promuove strategie di decarbonizzazione e transizione energetica.

Attraverso la simulazione di scenari climatici, l'analisi mira a individuare soluzioni progettuali efficaci e resilienti, valutando

[2] <https://annex80.iea-ebc.org/programme>

l'impatto di interventi quali l'integrazione di schermature solari, l'utilizzo di superfici ad alta riflettanza solare ed il *ventilative cooling*. L'obiettivo è comprendere se le tecnologie e le soluzioni adottate oggi siano effettivamente in grado di garantire prestazioni adeguate anche in condizioni climatiche mutate, anticipando così le criticità derivanti dall'aumento delle temperature e dai nuovi profili di fabbisogno energetico. Si propone, quindi, un approccio progettuale orientato non solo al rispetto dei requisiti normativi minimi, ma anche alla previsione delle evoluzioni climatiche, con l'intento di elaborare strategie resilienti, sostenibili e durevoli.

[3] Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (Eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2014.

Dopo aver delineato il quadro generale del cambiamento climatico e dei suoi effetti, sintetizzati anche in **Figura 1** nella pagina successiva, diventa fondamentale approfondire il sistema normativo che regola oggi l'uso, la produzione e la gestione dei dati climatici previsionali. Questi dati rappresentano un elemento per interpretare l'evoluzione delle condizioni atmosferiche future e per orientare in modo consapevole le strategie di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici. La crescente disponibilità di modelli climatici, scenari emissivi e proiezioni ad alta risoluzione rende necessario un quadro regolatorio chiaro, capace di garantire affidabilità, comparabilità e trasparenza degli strumenti previsionali impiegati nella pianificazione territoriale e nella progettazione edilizia.

Il ricorso ai dati climatici previsionali non è più un'opzione marginale, ma una componente strutturale nella definizione delle politiche ambientali, nella gestione del rischio climatico e nello sviluppo di strumenti tecnici e normativi. Essi costituiscono la base attraverso cui istituzioni,

amministrazioni e professionisti possono valutare in anticipo la vulnerabilità del costruito, prevedere l'evoluzione dei fenomeni estremi e definire criteri prestazionali adeguati alle condizioni climatiche attese. Di conseguenza, il quadro normativo non solo disciplina le modalità con cui tali dati devono essere raccolti e utilizzati, ma stabilisce anche standard e requisiti minimi per garantire omogeneità nei processi decisionali che coinvolgono il clima futuro.

La crescente attenzione verso la resilienza climatica ha determinato l'integrazione dei dati previsionali in numerosi strumenti di pianificazione urbanistica, valutazione ambientale e progettazione architettonica. Tale integrazione è sostenuta da direttive e regolamenti che rafforzano l'obbligo di considerare la variabilità climatica futura sin dalle fasi preliminari del progetto, trasformando le proiezioni climatiche in un riferimento normativo tanto tecnico quanto strategico. Nelle sezioni seguenti della tesi viene fornita una panoramica dei settori nei quali tali dati assumono un ruolo strategico, insieme ai possibili sviluppi futuri.



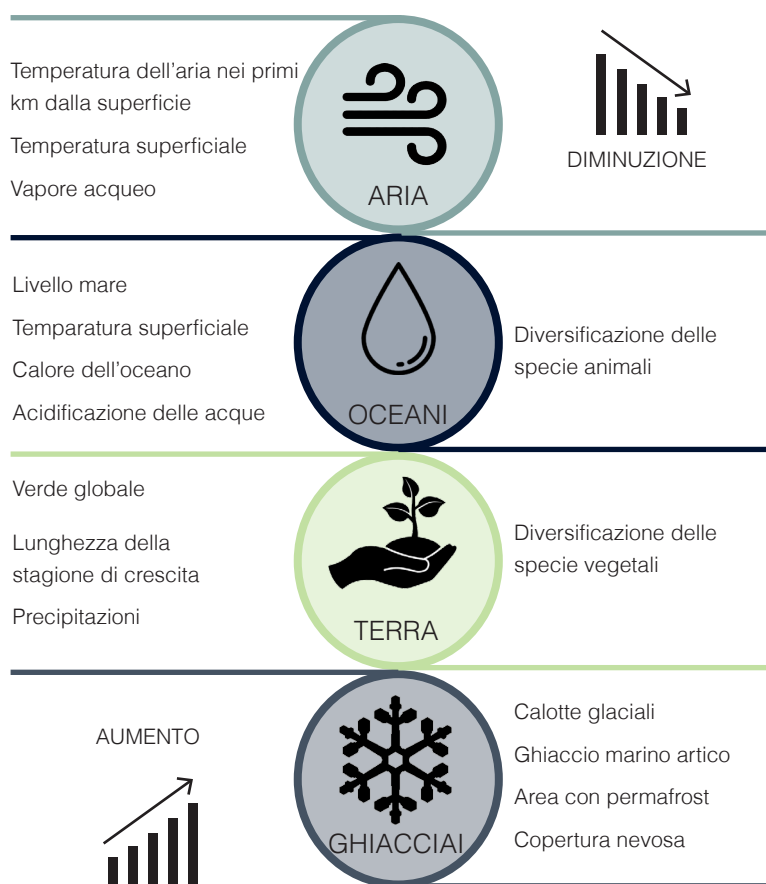


Figura 1:
Gli effetti del cambiamento climatico (IPCC, Working Group I Technical Support Unit)

1.1 Politiche di decarbonizzazione

[3] I gas climalteranti o gas ad effetto serra, sono sostanze che, assorbono il calore e lo rilasciando nell'atmosfera, contribuendo al riscaldamento globale. I principali sono l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4) e il protossido di azoto (N_2O). Questi aumentano l'effetto serra che in realtà è un processo naturale che mantiene la Terra a una temperatura adatta alla vita, tuttavia l'eccessivo aumento di questi gas nell'atmosfera, intensifica questo effetto, causando l'aumento eccessivo delle temperature.

[4] Nazioni unite, *Paris Agreement*, United Nations Framework Convention on Climate Change, Parigi, 2015.

Riassumendo, i più recenti rapporti dell'IPCC evidenziano come, in assenza di efficaci politiche di mitigazione, il riscaldamento globale continuerà ad intensificarsi nel corso del XXI secolo; in particolare, nelle aree a clima temperato e mediterraneo, è previsto un progressivo incremento del fabbisogno di raffreddamento estivo, che in molti casi potrà superare la riduzione del fabbisogno di riscaldamento invernale. Tale scenario richiede una revisione delle priorità progettuali e del quadro

normativo, che dovrà orientare le strategie di *retrofit* verso soluzioni capaci di garantire *comfort* estivo e un controllo più efficace della domanda energetica legata al raffreddamento.

In questo contesto risulta essere necessario focalizzarsi sul tema dell'importanza dei dati climatici previsionali in un'ottica di politiche di decarbonizzazione verso cui si sta spingendo l'Unione Europea. Il concetto di decarbonizzazione in ambito architettonico ed urbano deve essere una risposta strategica alla crisi climatica per la transizione verso un ambiente costruito a basse emissioni di anidride carbonica e gas clima alteranti [3]. Questi obiettivi vengono esplicitati in molti trattati europei ed internazionali che stabiliscono delle *time-line* e delle sfide da raggiungere per avviare il pianeta ed il settore edilizio verso un concetto di neutralità nelle emissioni.

Un esempio è rappresentato dall'Accordo di Parigi [4], adottato nel 2015 durante la seduta della COP21 (ventunesima Conferenza delle Parti sul cambiamento climatico), questo documento, che rielabora ed aggiorna il Protocollo di Kyoto del 1997, stabilisce che l'aumento della temperatura globale deve essere contenuto al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, impegnandosi però a non superare gli 1,5 °C e che L'Europa ed Il Mondo dovrebbero raggiungere la *Carbon Neutral*, ovvero il

bilanciamento tra le emissioni di anidride carbonica e di gas serra generate e le emissioni riassorbite (o compensate, nei residui non riducibili, da attività non impattanti sull'ambiente) [5], quindi, raggiungere un equilibrio tra le emissioni antropiche e la capacità di assorbimento dei gas serra della Terra entro il 2050. Gli altri punti fondamentali del testo sono: gli NDCs, (Contributi Determinati a livello Nazionale) ovvero dei piani di finanziamento nazionale per l'impegno degli Stati nella riduzione delle emissioni, la trasparenza e monitoraggio di ogni Paese per verificare i progressi compiuti, la fornitura di un supporto economico ai Paesi in via di sviluppo nell'adattamento agli effetti al cambiamento climatico e la decarbonizzazione a partire da un settore chiave per l'economia come quello edile.

Proseguendo un altro importante documento sul tema emissioni zero, entrato in vigore nello stesso anno dell'Accordo di Parigi è sicuramente L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile ovvero un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità, sottoscritto dai 193 Paesi facenti parte dell'ONU. Questa ingloba 17 SDGs ovvero obiettivi per lo sviluppo sostenibile che riguardano tutti i paesi e tutti gli individui ed ognuno di questi rappresenta tematiche di criticità da dover risolvere per poter raggiungere uno sviluppo sostenibile, tra questi troviamo temi come la lotta alla povertà,

l'eliminazione della fame e la possibilità di un lavoro dignitoso per tutti [6].

In particolare, i punti salienti per la trattazione di questo elaborato di tesi sono: il **Goal 7**: assicurare a tutti l'accesso a sistemi di energia economici, affidabili, sostenibili e moderni, infatti l'energia è il principale responsabile del cambiamento climatico e la sua produzione causa circa il 60% delle emissioni di gas serra globali, il **Goal 11**: rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili ed il **Goal 13**: adottare misure urgenti per combattere il cambiamento climatico e le sue conseguenze. Questi 3 **Goal** in particolare toccano i temi di decarbonizzazione e esplicitano l'importanza del passaggio da energia proveniente da fonti fossili a quella pulita proveniente ad esempio da fonti rinnovabili come il solare fotovoltaico che gli edifici possono installare sulle loro coperture per poter aumentare la percentuale di autosufficienza energetica [7], ma si focalizzano anche sull'importanza della gestione del cambiamento del clima e la necessità di intervenire in maniera tempestiva per limitare quanto più possibile i danni.

Un ulteriore documento da citare, ultimo di quelli presi in esame ma non per importanza, è il **Green Deal Europeo**, presentato dalla Commissione Europea nel 2019. Questo rappresenta a livello Europeo, la principale strategia per guidare gli Stati



Figura 2:
Simboli obiettivi 7, 11, 13, dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

[5] Definizione da vocabolario Treccani, accessibile online al sito <https://www.treccani.it/vocabolario/feedback>.

[6] Nazioni unite, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, 2015.

[7] L'autosufficienza energetica è la capacità di un edificio di produrre tutta l'energia che consuma, senza dipendere dalla rete elettrica pubblica. Ciò si ottiene tramite la produzione di energia da fonti rinnovabili come il solare, eolico o geotermico.



Figura 3:
Timeline dell'EPBD per edifici di nuova costruzione.

membri verso un modello di sviluppo climaticamente neutro entro il 2050, mirando a migliorare l'economia rendendola sostenibile ed inclusiva ma allo stesso competitiva, in risposta al cambiamento climatico e alla necessità di una crescita equa. Come detto in precedenza l'obiettivo cardinale è arrivare a zero emissioni nette di carbonio entro il 2050 ma intanto esplicita un traguardo intermedio da raggiungere cioè la riduzione entro il 2030 del 55% delle emissioni di gas serra, rispetto ai livelli preindustriali, inoltre evidenzia come per poter raggiungere questi punti ci sia bisogno di interventi trasversali riguardo diversi temi come quello dell'energia, dei trasporti, dell'industria, dell'agricoltura dell'economia circolare e dell'ambiente costruito.

Si può notare come all'interno del **Green Deal** un ruolo centrale è attribuito al settore delle costruzioni; infatti, per affrontare questa sfida la Commissione Europea ha presentato l'iniziativa **Renovation Wave for Europe** che si propone di migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente, ponendosi come obiettivo quello di raddoppiare entro il 2030 il tasso di ristrutturazione energetica degli edifici pubblici e privati già esistenti sul territorio europeo [8]. La ristrutturazione diventa quindi un tassello imprescindibile per raggiungere l'obiettivo di dimezzare le emissioni entro il 2030, per fare ciò tutti i membri

dell'Unione dovrebbero ridurre del 60 % le emissioni degli edifici, del 14 % il loro consumo di energia e del 18 % il consumo energetico per soddisfare il fabbisogno per riscaldamento e raffreddamento.

Al giorno d'oggi la percentuale di edifici ristrutturati profondamente, ovvero sia a livello di involucro che a livello impiantistico risulta veramente esigua; infatti, corrisponde all' 1 % in tutta Europa, anche se questa percentuale si alza leggermente se viene fatto riferimento ai rifacimenti che si limitano agli aspetti lato involucro. La **renovation Wave** vuole aumentare queste percentuali a partire dal nome stesso "ondata di ristrutturazioni" in primo luogo per abbassare le emissioni di anidride carbonica equivalente [18] ma anche per rendere gli edifici più sani, ecologici, interconnessi all'interno di un quartiere sia dal punto vista sociale che energetico, resilienti ad eventi naturali estremi e magari dotati anche di punti per la ricarica elettrica delle auto.

In questo quadro strategico, la direttiva europea sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD – **Energy Performance of Buildings Directive**) rappresenta lo strumento legislativo fondamentale per tradurre in azioni concrete gli obiettivi del **Green Deal** e della **Renovation Wave**. La EPBD, recentemente aggiornata, stabilisce standard minimi di prestazione energetica

[8] European Commission, *A Renovation Wave for Europe: Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives*, COM (2020) 662 final, 2020.

(MEPS), obblighi di ristrutturazione progressiva del patrimonio edilizio esistente e l'introduzione di metodologie di calcolo che tengano conto delle condizioni climatiche locali. Essa prevede inoltre che i nuovi edifici raggiungano livelli di emissioni quasi nulli e, in prospettiva, la neutralità climatica, rafforzando l'integrazione delle fonti rinnovabili e l'uso di tecnologie digitali per la gestione energetica. La direttiva sottolinea quindi la necessità che la progettazione e la riqualificazione degli edifici non si basino più su dati climatici storici, ma includano anche scenari futuri, così da garantire prestazioni resilienti e durature.

1.2 La resilienza ai cambiamenti climatici come paradigma progettuale

Per entrare nel vivo della questione, è utile richiamare la definizione di resilienza così come viene riportata all'interno del glossario del Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5) [9]:

“La capacità di un sistema socio-ecologico di far fronte a un evento pericoloso, o ad anomalie, reagendo o riorganizzandosi in modi che ne preservano le funzioni essenziali, l'identità e la struttura, mantenendo

tuttavia anche le capacità di adattamento, apprendimento e trasformazione.”

Questa definizione diventa molto importante anche nel contesto della riqualificazione energetica degli edifici, dove il concetto di resilienza può essere interpretato come la capacità di un intervento di garantire nel tempo le prestazioni energetiche attuali, anche in presenza di scenari climatici futuri mutati e peggiorativi, ovvero, un intervento resiliente è tale se riesce a mantenere, o addirittura migliorare l'efficienza energetica dell'edificio nel lungo periodo, neutralizzando gli effetti negativi del cambiamento climatico. Ciò significa che, a parità di utilizzo e condizioni operative, il consumo energetico futuro dell'edificio riqualificato dovrebbe essere uguale o inferiore rispetto a quello attuale, nonostante l'alterazione delle condizioni esterne come, ad esempio, l'aumento delle temperature medie, ondate di calore più frequenti, ecc.

Da questo punto di vista, la resilienza energetica non è semplicemente una caratteristica intrinseca del sistema edificio-impianto, ma è il risultato di decisioni progettuali e tecnologiche specifiche, che partono da una progettazione attenta che include la previsione di cambiamenti climatici e tiene in conto il ciclo di vita della struttura, con il fine di ottimizzare la solidità, la flessibilità e soprattutto la durabilità delle soluzioni adottate. Nello specifico, la

Edifici esistenti
NON RESIDENZIALI



Figura 4:
Soglie di efficienza energetica per edifici non residenziali: entro il 2030 dovranno superare il 16% degli edifici con le peggiori prestazioni energetiche, e entro il 2033 il 26%, rispetto ai livelli del parco immobiliare nazionale al 1° gennaio 2020.

Edifici esistenti
RESIDENZIALI

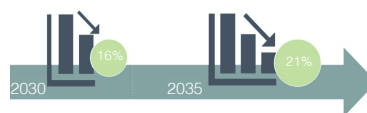


Figura 5:
Traguardi di riduzione del consumo medio di energia primaria del 16% entro il 2030 e del 20-22% entro il 2035, per edifici residenziali da ristrutturare.

[9] Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (Eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2014.

resilienza nel settore edilizio può essere compresa adeguatamente solo se analizzata in relazione ai due approcci complementari che ne determinano l'efficacia nel fronteggiare il cambiamento climatico e che rappresentano i due pilastri fondamentali di questo concetto ovvero: la mitigazione, volta a ridurre le cause del riscaldamento globale, e l'adattamento, finalizzato a minimizzarne gli impatti.

1.2.1 Mitigazione

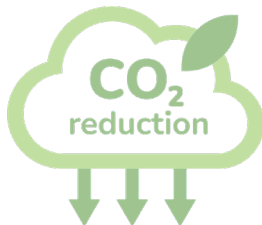
Il termine mitigazione viene anch'esso definito all'interno del glossario del Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC [10] come:

“l'insieme delle strategie e azioni volte a ridurre le emissioni di gas climalteranti, principalmente attraverso l'efficienza energetica, l'uso di fonti rinnovabili e una progettazione bioclimatica. In ambito edilizio, le misure di mitigazione includono interventi sull'involucro, come l'isolamento termico avanzato, la riduzione delle dispersioni termiche, l'ottimizzazione della forma e orientamento dell'edificio, oltre all'adozione di impianti ad alta efficienza”.

Le linee guida europee e nazionali suggeriscono, in particolare, una riduzione di almeno il 30% dell'energia primaria impiegata negli edifici rispetto allo stato di fatto, come obiettivo minimo per qualificare un intervento come mitigante. Come si può evincere da

questa definizione la riduzione delle emissioni di gas climalteranti passa attraverso misure molto concrete che si suddividono per quanto riguarda un **retrofit** edilizio in due fasi ben definite e necessarie: riduzione del fabbisogno energetico e l'efficientamento del sistema di impianti. Nel primo caso per ridurre la quantità di energia primaria richiesta agli impianti sono necessarie azioni di miglioramento dell'involucro esterno dell'edificio, sia per quanto riguarda azioni di riduzione del fabbisogno invernale come, per esempio, l'inserimento di serramenti isolati adeguatamente e con rivestimenti basso emissivi [11], intervenire dove possibile isolando dal lato esterno dell'edificio altrimenti su quello interno pareti e coperture per ottenere un'adeguata coibentazione termica, ma anche correggere dove possibile la dispersione dei ponti termici presenti, utilizzando sempre materiali con una trasmittanza adeguata.

Per quanto riguarda le stagioni calde o climi più mediterranei risulta fondamentale controllare e limitare l'ingresso della radiazione solare attraverso l'utilizzo di schermature esterne mobili o fisse, brise-soleil, vetri selettivi che filtrano l'irraggiamento solare senza compromettere la luminosità, finiture esterne di colore chiaro, capaci di riflettere la radiazione solare e tetti verdi che ombreggiano, isolano ed assorbono calore durante il giorno grazie ad uno



[10] Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (Eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2014.

[11] I rivestimenti o film basso emissivi sono rivestimenti sotto forma di strati metallici sottilissimi applicati al vetro che in base alla posizione in cui vengono applicati possono o ridurre la dispersione (basso emissivi) del calore nei climi freddi o controllare l'ingresso della radiazione solare (selettivi) nei climi caldi.

uno strato massivo di vegetazione, quest'ultimo inoltre rilascia vapore acqueo nell'aria attraverso un processo chiamato evapotraspirazione, che sottrae calore all'ambiente circostante. Un'altra strategia di riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento è rappresentata dalle facciate adattive ovvero sistemi che sono in grado di interagire con l'ambiente esterno e modificare il proprio comportamento nel tempo per migliorare *comfort* interno ed efficienza energetica.

Come detto in precedenza, oltre a lavorare sull'involucro, anche l'efficientamento degli impianti contribuisce in modo decisivo alla riduzione delle emissioni climateranti: questo processo passa attraverso una revisione profonda dell'intero sistema, cercando di limitare le dispersioni di energia in tutte le fasi del ciclo energetico ovvero generazione, distribuzione, regolazione ed emissione. In aggiunta risulta altrettanto importante l'integrazione di fonti rinnovabili in loco, come il solare fotovoltaico per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili o il solare termico per l'acqua calda sanitaria; rappresenta un ulteriore passo verso l'autonomia energetica, l'adozione di sistemi di accumulo, come le batterie che consentono di incrementare l'autoconsumo, riducendo il prelievo di energia dalla rete e ottimizzando l'efficienza complessiva del sistema edificio-impianto.

La mitigazione, quindi, non può essere considerata come un'attività disgiunta da altre fasi del processo progettuale: è necessario

valutare fin da subito l'efficacia delle strategie attraverso indicatori tecnici normativi, tra cui il più rilevante è la quantità di CO₂ emessa. In questo senso, diventa essenziale dimostrare, con calcoli e modelli conformi alla normativa vigente, che le soluzioni adottate portano a una riduzione misurabile delle emissioni. Per affrontare questo tema in modo completo, è inoltre fondamentale considerare il ciclo di vita dell'edificio, come definito dalla norma UNI EN 15978 del 2011, che suddivide l'intero processo edilizio in diverse fasi:

- produzione (A1–A3)
- costruzione (A4–A5)
- uso (B1–B7)
- fine vita (C1–C4)
- eventuali benefici oltre il ciclo di vita (D)

La valutazione degli impatti ambientali associati a ciascuna di queste fasi avviene attraverso la metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA), che consente un'analisi dettagliata e comparabile delle emissioni di CO₂ e di altri indicatori ambientali lungo l'intero arco di vita dell'edificio. Tuttavia, nell'ambito della presente ricerca, l'analisi sarà circoscritta alla fase operativa, ovvero il consumo energetico in uso, poiché è in questa fase che si manifestano gli effetti diretti delle strategie di efficienza energetica e di progettazione sostenibile adottate. Le altre fasi come la produzione dei materiali (A1–A3) o la dismissione a fine vita (C1–C4) non verranno



Figura 6: Emissioni di CO₂ associate al ciclo di vita di un manufatto edilizio (elaborazione degli autori su fonte: BPIE (*Buildings Performance Institute Europe*) (2021). *Whole-life carbon: challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings*

- **Embodied carbon**
- **Operational carbon**

approfondite ma rimangono essenziali in un'analisi LCA completa (descritta all'interno normativa [12]) soprattutto per valutare *l'embodied carbon* complessiva, ovvero la CO₂ incorporata nei materiali e nei processi costruttivi.

1.2.2 Adattamento



Anche per il termine di adattamento il glossario del Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC determina una definizione:

“il processo di adattamento al clima attuale o atteso e ai suoi effetti. Nei sistemi umani, l'adattamento cerca di limitare i danni o di sfruttare le opportunità favorevoli. Nei sistemi naturali, l'intervento umano può agevolare l'adattamento al clima atteso e ai suoi effetti” [13].

Se con la mitigazione l'obiettivo era quello di agire sulla causa del cambiamento climatico ovvero l'aumento delle emissioni di gas ad effetto serra, qui invece si cerca di lavorare sull'effetto, partendo dall'assunzione che ormai qualcosa all'interno del clima sia già stato alterato e cercando di migliorare le azioni umane rispetto a dei cambiamenti ormai già in atto.

L'adattamento implica, infatti, un processo di risposta ai cambiamenti già in atto, nel tentativo di ridurre la vulnerabilità dei sistemi umani e naturali e di aumentarne la resilienza: questo in ambito

urbano e architettonico, si traduce nella progettazione e nella trasformazione di spazi e strutture capaci di reagire efficacemente a eventi climatici sempre più frequenti ed estremi. Per quanto riguarda la progettazione dello spazio urbano, negli ultimi anni, le *Nature-Based Solutions* hanno iniziato ad assumere un ruolo centrale in questo processo; si tratta di interventi ed azioni che traggono ispirazione dalla natura stessa e dai suoi processi per migliorare la gestione delle acque meteoriche, il microclima urbano e la qualità ambientale degli spazi costruiti. Secondo quanto espresso dalla commissione europea nel documento *“Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities”* [14], queste soluzioni si suddividono in tre macrocategorie, che si distinguono in base al grado di trasformazione dell'ambiente e all'intensità dell'intervento dell'uomo:

- protezione degli ecosistemi naturali, per conservarne le funzioni, ad esempio tutela di foreste e zone umide naturali
- gestione sostenibile di ecosistemi esistenti, utilizzando in maniera responsabile le risorse per non compromettere l'equilibrio dell'ecosistema, come nell'agricoltura rigenerativa o nella silvicoltura controllata
- ripristino o creazione di ecosistemi, questa azione comprende interventi per riqualificare o creare nuovi

[12] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN 15978:201 *Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della prestazione ambientale degli edifici Metodo di calcolo*, Milano, 2011.

[13] Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (Eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2014.

[14] European Commission, *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities*, Brussels, Directorate-General for Research and Innovation, 2015.

spazi verdi, soprattutto in contesti urbani e antropizzati.

In particolare, l'ultima categoria risponde bene ad un contesto urbano che ha bisogno di essere sempre più adattivo e dove la necessità di soluzioni capaci di affrontare eventi climatici estremi e degrado ambientale è sempre più urgente; con un **focus** sulla gestione delle importanti portate di acqua piovana a seguito di piogge di estrema intensità.

Tra gli esempi di azioni di adattamento di questa categoria troviamo le piazze o aree "alluvionabili", progettate per accogliere temporaneamente grandi quantità d'acqua in caso di piogge intense, riducendo il rischio di allagamenti e contribuendo allo stoccaggio naturale delle acque, come i giardini della pioggia, rappresentati da spazi verdi capaci di assorbire e filtrare l'acqua attraverso suoli permeabili e vegetazione selezionata, restituendo così una funzione ecologica al tessuto urbano, ma anche i tetti verdi, già citati per la mitigazione, si inseriscono in questa logica, offrendo superfici vegetate che, oltre a trattenere parte delle precipitazioni, svolgono una funzione isolante e contribuiscono a mitigare l'effetto "isola di calore" tipico dei contesti urbani densamente costruiti. In aggiunta, interventi volti a evitare o ridurre il **run-off** [15], come l'uso di pavimentazioni drenanti, bacini di contenimento e canali verdi, completano il quadro di una

città più resiliente, capace di gestire in modo sostenibile le acque piovane e di rispondere alle criticità connesse al cambiamento climatico.

Per valutare in modo sistematico quali benefici ambientali e sociali derivano da queste soluzioni, un ruolo fondamentale è svolto dal CICES [16], **Common International Classification of Ecosystem Services**, ovvero una classificazione internazionale che permette di descrivere e misurare i servizi ecosistemici forniti dagli ecosistemi, cioè quei benefici materiali ed immateriali che la natura offre alla società attraverso le **Nature-Based Solutions**. La classificazione CICES distingue tre grandi categorie di servizi: di approvvigionamento come acqua ed alimenti, di regolazione e mantenimento come la purificazione dell'aria o la regolazione del clima e culturali come il valore ricreativo e identitario degli spazi verdi, cercando di far rientrare ogni azione prodotta dalle NBS all'interno di una specifica sottocategoria.

Tuttavia, l'adattamento non riguarda solo le infrastrutture urbane, ma si confronta anche con una scala dell'edificio, quella che sarà utile per lo sviluppo di questo elaborato di tesi; infatti, i temi di maggiore interesse sono: la qualità degli ambienti interni degli edifici e la capacità di garantire comfort e benessere agli occupanti anche in condizioni climatiche estreme. In



[15] Deflusso superficiale delle acque piovane nelle aree urbane, ricco di inquinanti ed una elevata velocità, che causa un incremento del picco di flusso che la rete fognaria non è in grado di assorbire.

[16] Haines-Young, R., & Potschin, M., *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure*, European Environment Agency, 2018.

questo contesto, risultano particolarmente rilevanti alcuni parametri fisico-ambientali, come la temperatura interna, che dovrebbe rimanere entro un intervallo ottimale anche in assenza di sistemi attivi di riscaldamento o raffrescamento; l'umidità relativa, che influisce sia sulla percezione del *comfort* che sulla qualità dell'aria; la qualità della ventilazione naturale, che può ridurre la dipendenza da impianti meccanici e migliorare la salubrità degli ambienti; l'inerzia termica e l'isolamento dell'involucro, fondamentali per limitare le escursioni termiche giornaliere; e infine l'illuminazione naturale, che contribuisce al benessere visivo e alla riduzione dei consumi energetici.

Tutti questi aspetti legati al *comfort* interno saranno per questa tesi indicatori fondamentali per rendicontare il parametro dell'adattamento, come in precedenza le emissioni di CO₂ equivalente per la mitigazione, inoltre questi parametri relativi al confort sono oggetto di specifiche normative tecniche, come per esempio la normativa EN 16798 parte 1 del 2019 [17], che stabilisce i criteri di progettazione per gli ambienti interni, in relazione alla qualità dell'aria, alla temperatura, all'umidità relativa e all'illuminazione, mentre a livello nazionale, il Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 [18], noto come Decreto Requisiti Minimi, rappresenta un riferimento normativo centrale per quanto riguarda le prestazioni energetiche e il

comfort interno degli edifici, integrando criteri ambientali e climatici nella valutazione della qualità edilizia.

1.3 Tassonomia dell'Unione Europea

Il *Green Deal Europeo* di cui si è parlato in precedenza, riassumendo è un documento che contiene strategie politiche ed ambientali per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, determinando quindi una visione a lungo termine che coinvolge parecchi settori come quello dell'energia, dell'edilizia, dei trasporti, dell'agricoltura e dell'industria.

Precedentemente a questo documento però, nel 2018 viene emanato l'*Action Plan on Financing Sustainable Growth*, uno strumento finanziario che supporta il *Green Deal* e punta a riformare il sistema finanziario europeo per supportare gli investimenti sostenibili anche nel campo dei finanziamenti per l'edilizia.

I principali obiettivi dell'*Action Plan* sono: riorientare i capitali verso investimenti sostenibili per supportare una crescita inclusiva, gestire i rischi finanziari derivanti dai cambiamenti climatici e promuovere la trasparenza e la visione a lungo termine nelle attività economiche e finanziarie [19]. Questi scopi portano nel 2020 alla creazione del Regolamento UE

[17] CEN (European Committee for Standardization), EN 16798-1:2019 *Energy performance of buildings, Ventilation for buildings, Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, Brussels, 2019.

[18] Ministero dello Sviluppo Economico, Decreto Ministeriale 26 giugno 2015: *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 162, 15/07/2015.

[19] Commissione Europea, *Piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile* (COM (2018) 97 final), Bruxelles, 8 marzo 2018.

2020/852 (Parlamento Europeo e Consiglio dell'UE, 2020) che introduce la Tassonomia dell'Unione Europea, ovvero un modello di classificazione delle attività finanziarie in base a quanto queste ultime risultano sostenibili e resilienti dal punto di vista ambientale, e fornisce inoltre delle linee guida per capire dove indirizzare gli investimenti per portare l'Europa sempre più verso una transizione verde.

Il regolamento UE 2020/852 [20] introduce per la Tassonomia sei obiettivi ambientali:

- La mitigazione dei cambiamenti climatici
- L'adattamento ai cambiamenti climatici
- L'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine
- La transizione verso un'economia circolare
- La prevenzione e la riduzione dell'inquinamento
- La protezione ed il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi.

Affinché un'attività sia considerata eco-sostenibile, sempre secondo quanto espresso nel Regolamento della Tassonomia Ue, deve soddisfare contemporaneamente i seguenti punti:

- a) contribuire in modo sostanziale al raggiungimento di uno o più degli obiettivi ambientali del Regolamento, precedentemente elencati
- b) non arrecare un danno significativo a nessuno degli obiettivi ambientali del Regolamento, principio del

DNSH (*Do No Significant Harm*)

- c) essere svolta nel rispetto delle garanzie minime di salvaguardia
- d) essere conforme ai criteri di vaglio tecnico fissati dalla Commissione

Per quanto riguarda i primi due obiettivi ambientali della Tassonomia la normativa di riferimento è il Regolamento Delegato UE 2021/2139 (Commissione Europea, 2021) anche noto come *Climate Delegate Act* (atto delegato sul clima), mentre per gli ultimi quattro scopi viene utilizzato il Regolamento Delegato UE 2023/2486 (Commissione Europea, 2023) noto anche come *Environmental Delegate Act* (atto delegato sull'ambiente).

L'obiettivo relativo alla mitigazione dei cambiamenti climatici risulta essere già abbastanza esplorato e normato anche grazie all'aiuto di strumenti consolidati come la Direttiva 2010/31UE nota anche come *EPBD recast*, che in Italia, viene recepita nel D.M. 26 giugno 2015. Questi documenti normano il miglioramento della prestazione energetica degli edifici, stabilendo requisiti minimi di prestazione energetica, applicabili sia ad edifici di nuova costruzione sia a quelli esistenti soggetti a ristrutturazioni importanti, facendo in modo che tutto il processo di ristrutturazione o nuova costruzione sia anche economicamente sostenibile, tramite analisi costi-benefici [21] dell'intero ciclo di

[20] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, Regolamento (UE) 2020/852 relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 198, 22.06.2020.

[21] L'analisi costi-benefici è un metodo di valutazione economica che considera i costi e i benefici di un'azione o di un progetto, entrambi espressi in unità monetarie, per determinare se l'iniziativa è vantaggiosa e conveniente.

vita e che tenga conto delle condizioni climatiche locali.

Per lo studio e l'utilizzo di dati climatici futuri assume invece particolare importanza il concetto di adattamento poiché riguarda in modo diretto la capacità degli edifici di resistere agli impatti futuri del cambiamento climatico che necessitano di file aggiornati e predittivi delle condizioni future del clima. Il regolamento sostiene che le soluzioni di adattamento dovrebbero essere valutate utilizzando le migliori proiezioni climatiche disponibili [22] per prevenire e ridurre gli effetti negativi del cambiamento climatico in relazione con specifiche località e contesti.

Il Regolamento Delegato UE 2021/2139 citato in precedenza esplicita maggiormente l'impiego dei dati climatici futuri nella valutazione dei rischi e delle vulnerabilità climatiche connessi alle attività economiche, infatti determina che per le attività con una vita utile prevista inferiore a dieci anni, si raccomanda l'utilizzo di proiezioni climatiche alla scala più appropriata e dettagliata possibile anche se il livello di dettaglio può non essere specifico quanto quello utilizzato per le attività a lungo periodo. Queste ultime, infatti, necessitano proiezioni climatiche ad alta risoluzione e basate sui più avanzati scenari futuri disponibili, utilizzati in modo coerente con la durata attesa dell'investimento: in particolare, si raccomanda di prendere in considerazione

scenari climatici di proiezioni future a partire da 10-30 anni, basandosi se possibile su quelli definiti dall'IPCC (Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico) come, ad esempio, gli scenari RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 [23].

La normativa sottolinea inoltre l'importanza di fare comunque sempre riferimento, quando possibile, alle migliori pratiche e alle linee guida più aggiornate per l'uso delle proiezioni climatiche e per le valutazioni d'impatto, utilizzando le conoscenze scientifiche più recenti in materia di vulnerabilità e analisi dei rischi, cercando di sfruttare le metodologie allineate ai più recenti rapporti dell'IPCC, a pubblicazioni scientifiche e a modelli climatici accessibili, siano essi *open source* o a pagamento. Questo approccio garantisce che le soluzioni di adattamento siano fondate su dati climatici affidabili e aggiornati, favorendo una gestione efficace dei rischi climatici e il rafforzamento della resilienza delle attività economiche.

Infine, viene evidenziata la necessità di aggiornare periodicamente tali valutazioni per tener conto di eventuali modifiche rilevanti nelle caratteristiche o nelle modalità operative delle attività analizzate e per cercare di avere un *dataset* di dati climatici sempre in aggiornamento e con la percentuale di incertezza più bassa possibile.

1.3.1 Report di Sostenibilità

[22] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, Regolamento (UE) 2020/852 relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 198, 22.06.2020, pag.19.

[23] Gli scenari RCP (Representative Concentration Pathways) dell'IPCC sono proiezioni utilizzate per modellare e prevedere l'evoluzione futura del clima sulla base di diversi livelli di concentrazione di gas a effetto serra nell'atmosfera. Sono stati introdotti nel Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5) e rappresentano percorsi ipotetici di emissioni fino al 2100, ciascuno associato a un diverso grado di forzante radiativa (cioè, l'aumento di energia intrappolata nell'atmosfera misurato in watt per metro quadrato, W/m²).

In riferimento a quanto esplicitato fino a questo punto, un argomento strettamente collegato alla Tassonomia dell'Unione Europea e all'utilizzo di dati climatici futuri è il **report** di sostenibilità, introdotto dalla Direttiva 2022/2464 UE, la **Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)** che entra in vigore al posto della Direttiva 2013/34/UE, la **Non-Financial Reporting Directive (NFRD)**. Quest'ultima viene rielaborata ed aggiornata grazie alla pubblicazione del **Green Deal Europeo** e a quanto esplicitato anche nella Tassonomia Europea, ad esempio quelle che venivano definite come "informazioni di carattere non finanziario", sono aggiornate in "informazioni sulla sostenibilità" quindi, anche se non erano definite con un termine totalmente appropriato si era capito quanto fosse importante per la gestione di un'azienda inserire aspetti ambientali e sociali che riguardino lo sviluppo verde di quest'ultima.

Il bilancio di sostenibilità, come descritto all'interno dell'articolo "La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE" [24], rappresenta un documento di comunicazione delle performance delle aziende in tema di sostenibilità ambientale, sociale e di governance, in modo strutturato tracciato e trasparente. Tale elaborato consente, in particolare per le PMI (Piccole e Medie Imprese), una comunicazione più efficace con gli attori

interessati, il rafforzamento della reputazione aziendale sul mercato, l'incremento della fiducia degli **stakeholder** ed una migliore capacità di attrarre talenti e figure specializzate. Il processo di rendicontazione favorisce inoltre, un'analisi critica di tutti i processi gestionali e della produzione dell'azienda, agevolando l'identificazione di problemi ed inefficienze, in modo tale da poter sviluppare un progetto di intervento per il miglioramento nella gestione delle risorse, la riduzione dei costi operativi e nella gestione delle variabili della sostenibilità ambientale.

La stesura di questo documento può essere un'operazione onerosa per quanto riguarda la mole di lavoro da realizzare ma per quanto descritto in precedenza risulta essere particolarmente utile anche dal punto di vista normativo, poiché rende possibile allinearsi ai requisiti legislativi in continua evoluzione, prevenire potenziali sanzioni e permette la conoscenza e l'inserimento dell'impresa in nuovi mercati. Il **report** di sostenibilità si avvale di due componenti principali: la prima che riguarda la rendicontazione di quanto emerso dall'applicazione della Tassonomia UE e la seconda che fa riferimento ai principi ESG.

Per quanto riguarda la sezione tassonomica la metodologia è quella descritta all'interno del "paragrafo 1.2" del presente elaborato di tesi. Gli ESG (**Enviromental**,



[24] Valeria Nesci, Ilaria Ballarini, Anna Ghirardi, Alice Gorino, Luca Paduos, Simona Paduos, *La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE*, 40° Convegno Nazionale AiCARR, 26 settembre 2024.



Social and Governance), in italiano ambientale, sociale e *Governance* stessa rappresentano tre ambiti cardine su cui effettuare analisi di sostenibilità per misurare le performance di un'azienda; questi indicatori vengono introdotti per la prima volta dal *Global Compact* delle Nazioni Unite [25], con il Report *"Who Cares Wins"* elaborato nel 2004, il quale afferma inoltre che integrare questi 3 criteri nelle decisioni finanziarie può essere utile per avere una finanza più etica e trasparente, migliorare la gestione dei rischi e creare aziende sostenibili nel lungo periodo; un altro documento che successivamente si concentra su indicatori di sostenibilità è l'Agenda 2030, descritta in precedenza, che introduce infatti i 17 SDGs ovvero 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile.

Nello specifico la lettera E dell'acronimo, che riguarda la componente ambientale comprende, secondo quando estrapolato dall'articolo "La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE" [26], la gestione delle risorse naturali, l'impatto ambientale, la sostenibilità delle materie prime e la biodiversità e tutela del territorio. Questi ambiti riguardano in particolare strategie per:

- la decarbonizzazione.
- resilienza al cambiamento climatico ed agli eventi meteorologici estremi.
- uso sostenibile delle risorse suolo e acqua: cercando

di diminuire ad esempio la percentuale di acqua dispersa per *run-off* [27] ed aumentare invece la quantità di acqua che riesce ad effettuare una infiltrazione profonda nel terreno.

- per tendere ad una gestione sempre più sostenibile di concetto di rifiuto, cercando secondo una scala gerarchica, in primo luogo, di prevenire la produzione del rifiuto stesso, preparandolo altrimenti al riutilizzo, introducendo il concetto di rifiuto visto come materia prima seconda oppure recuperando energia dagli scarti tramite la termovalorizzazione e infine come modalità meno preferibile il conferimento in discarica.

La dimensione della lettera S, ovvero quella sociale include il rispetto e la promozione sia dei diritti umani quali l'attenzione alla parità di genere, all'inclusione delle minoranze, ad un trattamento equo per ogni dipendente, ma anche alla promozione dei diritti dei lavoratori e quindi tematiche quali corrette condizioni di lavoro, sicurezza sul posto di lavoro e libertà di associazione. Si deve tenere conto anche di alcuni aspetti aggiuntivi per il dipendente quali il raggiungimento del benessere tramite politiche di *welfare*, continui aggiornamenti sulla formazione dei lavoratori e la ricerca dell'equilibrio tra impegno lavorativo e vita personale.

Le tematiche esplicitate precedentemente riguardano il rapporto azienda-lavoratore, ma ne vengono citate anche altre che si orientano

[25] Un'iniziativa volontaria lanciata nel 2000 dall'allora Segretario Generale delle Nazioni Unite, Kofi Annan, con l'obiettivo di incoraggiare le imprese di tutto il mondo ad adottare politiche sostenibili e socialmente responsabili.

[26] Valeria Nesci, Ilaria Ballarini, Anna Ghirardi, Alice Gorriño, Luca Paduos, Simona Paduos, *La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE*, 40° Convegno Nazionale AiCARR, 26 settembre 2024.

[27] Deflusso superficiale delle acque piovane causato da un'eccessiva copertura del terreno con pavimentazioni impermeabili come asfalto, che ingloba nel suo percorso un notevole carico di inquinanti.

invece sul rapporto tra l'azienda e la comunità nella quale quest'ultima si inserisce, quindi l'impatto sociale che può essere generato all'interno dei territori in cui questa opera. Un ulteriore punto che deve essere analizzato, per definire quanto un'attività sia sostenibile, è la tutela del consumatore poiché al fine di instaurare un rapporto di fiducia la ditta deve operare con massima trasparenza nella presentazione dei prodotti ed essere sempre attenta alla qualità di questi, anche avendo il pieno controllo che tutta la catena di fornitura dei materiali e delle risorse rispetti i diritti umani e le normative lungo tutta la filiera produttiva.

L'ultima lettera ovvero la G di **Governance** riguarda la struttura e il funzionamento interno dell'impresa, in particolare i meccanismi decisionali, la trasparenza, l'etica e la responsabilità. Vengono toccati infatti temi come la composizione del consiglio di amministrazione, che deve essere preferibilmente composto da soggetti diversificati ed indipendenti, la prevenzione della corruzione, la gestione dei conflitti di interesse, la definizione di politiche retributive eque per i dirigenti e l'adozione di sistemi efficaci di gestione del rischio. Un'organizzazione con una buona **governance** è in grado di prendere decisioni sostenibili, orientate al lungo termine e in linea con gli interessi di tutti gli **stakeholder**, anche attraverso una comunicazione chiara e

trasparente verso questi ultimi, in conformità con quello che deve essere un adeguato codice etico aziendale.

Come descritto fino a questo punto il bilancio di sostenibilità è un documento che relaziona quanto emerso dalla Tassonomia e dalle performance ESG. Al suo interno le informazioni legate al clima ovvero le **climate-related-disclosures** rappresentano un'importante sezione e potrebbero necessitare dello sviluppo di dati climatici futuri dato che le informazioni principali che contengono sono: la quantificazione dei rischi e delle opportunità del cambiamento climatico, la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra, la quantificazione dell'impatto finanziario attuale o futuro che può generare il cambiamento climatico e la scelta di strategie di adattamento e mitigazione.

In particolare, i tre principali riferimenti internazionali e normativi che aiutano le aziende nella produzione e comunicazione delle **climate-related disclosures** sono: i principi di rendicontazione e sostenibilità ESRS, la CSRD, le raccomandazioni della TCFD e gli standard GRI.

- Gli standard ESRS (**European Sustainability Reporting Standards**) che vengono emanati dall'EFRAG (**European Financial Reporting Advisory Group**) e normati all'interno della CSRD sono 12: due di carattere generale e 10 suddivisi nelle



[28] Valeria Nesci, Ilaria Ballarini, Anna Ghirardi, Alice Gorino, Luca Paduos, Simona Paduos, *La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE*, 40° Convegno Nazionale AiCARR, 26 settembre 2024.

categorie ESG. Quello che riguarda maggiormente i dati climatici futuri è l'ESRS E1, ovvero lo standard relativo ai cambiamenti climatici che tiene conto anche dei concetti di adattamento e mitigazione [28].

- Le raccomandazioni della TCFD (*Task Force on Climate-related Financial Disclosures*), elaborano un quadro volontario ma attualmente sempre più utilizzato a livello globale, per una rendicontazione che si basa su quattro punti principali: **governance**, gestione del rischio, strategia, metriche ed obiettivi. Tra i rischi analizzati dall'approccio TCFD ci sono anche quelli climatici che hanno bisogno di stime future di dati aggiornati e viene richiesto inoltre alle aziende di utilizzare scenari climatici futuri per testare la possibile resilienza [28].

- Gli standard introdotti dall'organizzazione internazionale GRI (*Global Reporting Initiative*: un servizio nato per supportare le aziende nella stesura del **report** sulla sostenibilità) non obbligano formalmente all'uso dei dati climatici futuri, ma ne prevedono l'integrazione come buona pratica, in particolare per gli standard GRI 302 e 305 sugli impatti climatici e per il GRI 201 sugli impatti economici promuovendo una gestione orientata al lungo termine [29].

Le **climate-related disclosures** non rientrano in un documento estraneo al bilancio di sostenibilità ma ne sono parte integrante e stanno assumendo

crescente rilevanza a causa di requisiti normativi e standard internazionali che cercano sempre di più di tenere conto di dati climatici e scenari di emissioni futuri.

1.3.2

Il principio DNSH.

Il principio “non arrecare un danno significativo” all'ambiente, ovvero il principio DNSH contenuto all'interno del Regolamento che introduce la Tassonomia UE, esplicita principalmente all'interno dell'articolo 17 dello stesso, che qualsiasi impresa o attività deve operare sempre in modo da cercare di rispettare contemporaneamente tutti gli obiettivi ambientali, precedentemente citati all'interno della sezione 1.1 di questo elaborato di tesi. Viene inoltre messo l'accento sul fatto che questo principio sia un punto di congiunzione tra il rispetto dell'ambiente e le politiche di sviluppo sostenibile ma anche sul fatto che prende in considerazione l'impatto ambientale dei prodotti e dei servizi forniti dall'azienda in un'ottica di ciclo di vita, considerando per la valutazione quindi le fasi di produzione, uso e anche il fine vita.

In correlazione a questo principio negli articoli 18 e 19 del Regolamento sulla Tassonomia UE vengono esplicitati due ulteriori concetti da rispettare per poter definire un'attività sostenibile: il primo stabilisce determinate garanzie minime in ambito sociale e dei diritti umani nel rispetto dei principi della guida OCSE [30],

[28] Valeria Nesci, Ilaria Ballarini, Anna Ghirardi, Alice Gorino, Luca Paduos, Simona Paduos, *La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE*, 40° Convegno Nazionale AiCARR, 26 settembre 2024.

[29] Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, *Final report: recommendation of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*, Svizzera, giugno 2017.

[30] L'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico è un'organizzazione, il cui obiettivo è promuovere politiche orientate alla crescita economica sostenibile e all'inclusione sociale. Nel contesto della tassonomia europea, il rispetto delle Linee guida OCSE rappresenta un requisito obbligatorio, in quanto tali linee promuovono principi di responsabilità d'impresa, tutela dei diritti umani e condizioni di lavoro dignitose.

mentre il secondo fa riferimento al fatto che i criteri generali usati nelle valutazioni devono essere basati su evidenze scientifiche affidabili e verificabili, avendo sempre alla base il rispetto del principio di precauzione soprattutto nei casi in cui sussistono delle incertezze rilevanti.

Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) è invece un insieme di investimenti e riforme che rappresentano lo strumento strategico che l'Italia deve presentare all'Unione Europea per poter usufruire dei finanziamenti disposti dal programma europeo **Next Generation Eu** (NGEU): iniziativa che nasce con l'intento di accelerare la transizione ecologica e digitale in risposta alla crisi pandemica di COVID-19. Questo Piano, si articola in sei Missioni e beneficia del lavoro congiunto avvenuto tra il Parlamento e la Commissione Europea, infatti, secondo quanto espresso nel documento del PNRR [31] le sei Missioni sono:

- digitalizzazione, innovazione, competitività, cultura e turismo
- rivoluzione verde e transizione ecologica
- infrastrutture per una mobilità sostenibile
- istruzione e ricerca
- inclusione e coesione
- salute

In particolare, il principio **“Do No Significant Harm”** (DNSH) assume un ruolo di centrale importanza sia nell'ambito della Tassonomia

Ue, come visto in precedenza, sia nell'ambito del PNRR, dato che anche in questo caso ogni finanziamento deve essere fatto nel rispetto delle sei Missioni elencate qui sopra. Il principio DNSH risulta essere trasversale a più normative ed esso stesso viene normato dalla Circolare MEF-RGS n.22 del 14 maggio 2024 che esplicita le informazioni riguardo le verifiche da effettuare per garantire il rispetto di tale principio.

Secondo quanto espresso nella guida tecnico operativa “ Il principio DNSH e l'analisi dei rischi climatici nel PNRR” [31] , l'utilizzo di dati climatici corretti diventa fondamentale nell'ambito del secondo obiettivo relativo all'adattamento, infatti viene introdotta per supportare il rispetto di questa tematica l'analisi dei rischi climatici negli interventi PNRR che risulta essere obbligatoria per qualsiasi tipo di intervento ed utilizza dati climatici sia attuali che futuri con proiezioni a medio-lungo termine, fornite da soggetti quali il Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC), **Copernicus** oppure dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, ovvero il principale strumento strategico italiano che mira a ridurre la vulnerabilità del territorio, delle persone e dei settori socioeconomici, agli impatti dei cambiamenti climatici, e a rafforzare la resilienza di sistemi naturali e antropici).

La valutazione prende in

[31] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), *Il principio DNSH e l'analisi dei rischi climatici nel PNRR – Vademecum per i soggetti attuatori delle misure MASE, a cura della DG COGESPRO*, Unità di Missione per il PNRR, 2024.

considerazione quattro macrocategorie di fattori climatici: temperature, venti, acqua, massa solida ma anche elementi come la sensibilità dell'intervento ai fenomeni climatici (es. ondate di calore, alluvioni, siccità), l'esposizione geografica e la vulnerabilità complessiva dell'opera. A seconda della portata dell'investimento (interventi al di sotto dei 10 milioni di euro o interventi infrastrutturali con investimento che supera i 10 milioni di euro) l'analisi si articola in metodologie più o meno approfondite e include l'individuazione e l'attuazione di misure di adattamento coerenti con le strategie locali e nazionali. L'integrazione sistematica dei dati climatici futuri nelle procedure progettuali rappresenta quindi una condizione imprescindibile per assicurare la resilienza delle opere pubbliche e private finanziate dal PNRR, in conformità al principio DNSH.



[32] Ministero dell'Istruzione, Decreto Ministeriale 23 giugno 2022, *Modalità di redazione dell'elaborato finale per la formazione iniziale dei docenti*, Gazzetta Ufficiale n. 183 del 06/08/2022.

1.3.2.1 CAM e Appalti Pubblici

Nel contesto attuale della progettazione architettonica, le sfide poste dalla crisi climatica stanno trasformando i criteri con cui si realizzano gli edifici. In questo scenario, la Pubblica Amministrazione, principale committente di opere pubbliche, spesso di grande rilevanza, ricopre un ruolo decisivo nel favorire la transizione ecologica del settore delle costruzioni. Tra gli strumenti più incisivi di cui dispone vi sono i Criteri Ambientali Minimi (CAM)

obbligatori in tutti gli appalti pubblici, che introducono parametri ambientali vincolanti lungo l'intero ciclo di vita dell'opera. L'adozione dei CAM si integra pienamente con il principio DNSH; attraverso la loro applicazione negli appalti pubblici, questi diventano fondamentali per garantire che le opere pubbliche rispettino i requisiti del DNSH, contribuendo concretamente alla riduzione degli impatti ambientali e alla decarbonizzazione del settore edilizio.

I CAM sono quindi parametri tecnici precisi che si fondano su principi sia dell'economia circolare che della bioarchitettura e che promuovono la salubrità degli spazi, cercando di non perdere di vista il risparmio energetico e la quantificazione degli impatti. I criteri che vengono utilizzati per fare valutazioni di tipo ambientale riguardano [32]:

- l'utilizzo di materiali riciclati (materia prima seconda), locali e durevoli.
- le valutazioni realizzate attraverso analisi LCC (*Life Cycle Costing*) per la parte economica e analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) per valutazioni ambientali sull'intero ciclo di vita.
- la riduzione degli impatti ad acqua, suolo, aria e biodiversità.
- il *comfort* dell'ambiente interno: termico, visivo, acustico e della qualità dell'aria.
- la facilità di disassemblaggio per il riutilizzo a fine vita.

I CAM sono requisiti ambientali obbligatori introdotti nell'ambito del Piano d'Azione Nazionale (PAN), in

particolare nella sua terza edizione che prende il nome di Piano d'Azione Nazionale per la sostenibilità ambientale dei consumi nella pubblica amministrazione (PAN GPP, ovvero Piano d'Azione Nazionale per il **Green Public Procurement**), adottato l'11 Aprile 2008 ed aggiornato successivamente nel 2013 e nel 2023. L'acronimo GPP (**Green Public Procurement**, tradotto come Appalti Pubblici Verdi) rappresenta il frutto del lavoro congiunto del Ministero dell'ambiente, dell'economia e delle finanze; infatti, vengono introdotti in questa normativa aspetti legati ai cambiamenti climatici, all'economia circolare e alla tutela di aspetti anche sociali ed etici ma anche un sistema di monitoraggio nazionale per capire l'effettivo grado di applicazione di questi requisiti.

I CAM non sono presenti solamente dal Piano d'Azione Nazionale ma inseriti nel Codice dei Contratti Pubblici, all'interno del Decreto Legislativo 50/2016 emanato nel 2016, in particolare nell'articolo 34: Criteri di sostenibilità energetica ed ambientale che vede l'inserimento di obbligo per le stazioni appaltanti di aggiungere nei documenti di gara d'appalto anche i Criteri Ambientali Minimi. In aggiunta i CAM per l'edilizia sono esplicitati dal Ministero dell'Ambiente e della sicurezza energetica (MASE) nel Decreto Ministeriale del 23 giugno 2022, pubblicato in Gazzetta Ufficiale come numero 183, il 6 agosto 2022. In questo documento [33]

vengono, in primo luogo, definiti gli ambiti di applicazione dei CAM, ovvero tutti gli appalti pubblici di lavori edilizi disciplinati dal Codice dei Contratti, interventi parziali o di manutenzione con applicazione limitata ad alcune sezioni specifiche ed anche gli edifici vincolati o storici, compatibilmente con le esigenze di tutela e conservazione; vengono inoltre definiti criteri tecnici per scegliere professionisti ed imprese che hanno esperienza nella progettazione sostenibile, nell'utilizzo di materiali eco compatibili e nel precedente utilizzo dei CAM o delle certificazioni ambientali. In aggiunta la normativa presenta delle specifiche tecniche progettuali suddivise in 3 ambiti: aspetto territoriale/urbanistico (gestione delle superfici, integrazione paesaggistica, infrastrutture verdi, mobilità sostenibile, gestione delle acque, riduzione dell'isola di calore urbana), livello edilizio (efficienza energetica, qualità dell'aria, illuminazione naturale, **comfort** acustico, ventilazione, dispositivi di ombreggiamento, materiali a basso impatto, risparmio idrico, piani di manutenzione e "**DfD**") [34] e aspetto dei singoli prodotti da costruzione (requisiti su materiali da costruzione come legno, acciaio, calcestruzzo, laterizi e su emissioni indoor); questi tre ambiti cercano di prendere in considerazione tutte le scale utilizzate da quella territoriale a quella specifica del materiale utilizzato.

La verifica di conformità

[33] Ministero dell'Istruzione, Decreto Ministeriale 23 giugno 2022, *Modalità di redazione dell'elaborato finale per la formazione iniziale dei docenti*, Gazzetta Ufficiale n. 183 del 06/08/2022.

[34] DfD, ovvero Design for Dissassembly: cercare di costruire pensando al fine vita del fabbricato ed al suo disassemblaggio. Questa tipologia di costruzione prevede di evitare saldature e giunzioni incollate e preferire incastri, evitare colle e siliconi

ai criteri CAM deve essere composta da più elementi quali la Relazione CAM che viene redatta dal tecnico progettista e che esplicita i criteri selezionati ed applicati in materia di sostenibilità e motiva eventuali opzioni escluse; le certificazioni ambientali di prodotto come l'EPD (*Environmental Product Declaration*) o le etichette ambientali ISO e deve contenere anche i controlli in fase di cantiere e gara d'appalto per comprendere se è necessario applicare eventuali sanzioni contrattuali a causa del mancato rispetto dei criteri.

Nello specifico le *ISO Type* possono essere di tipo I, II e III e sono delle etichette ambientali che forniscono informazioni certificate e comparabili secondo determinate variabili sui prodotti e materiali utilizzati, basandosi su differenti gradi di verifica esaminati tutti sempre con trasparenza. In particolare, la *ISO Type I* fa riferimento agli standard europei ed internazionali contenuti nella UNI EN ISO 14024 ed è su base volontaria come anche le ISO di tipo due e tre; viene richiesta la verifica del corretto funzionamento da parte di terzi, si basa su valutazioni multicriterio [35] che interessano tutto il ciclo di vita e contiene al suo interno criteri qualitativi. La *ISO Type* di tipo due viene normata dalla UNI EN ISO 14021, ma a differenza della precedente è un'autodichiarazione e quindi non necessita di verifica da un ente esterno e per questo deve essere

particolarmente specifica, documentata e trasparente, mentre la ISO di tipo tre viene descritta all'interno della UNI EN ISO 14025 e fornisce un documento tecnico-informativo che ha la necessità di essere verificato da parte di terzi e che si basa su analisi LCA: un esempio di questa etichetta è la EPD, citata in precedenza.

Riassumendo i Criteri Ambientali Minimi sono un'opportunità significativa per l'edilizia in generale ed in particolar modo per quella pubblica per cercare di allinearsi agli obiettivi del *Green Deal Europeo*, dato che non sono solamente degli strumenti tecnici o amministrativi ma rappresentano delle strategie per indirizzare il settore delle costruzioni verso una maggiore efficienza e resilienza. L'utilizzo corretto e diffuso dei CAM consente di mettere l'accento su criteri ambientali che fondano le basi sull'utilizzo anche di variabili climatiche e meteorologiche, fondamentali per capire come i materiali e componenti devono essere utilizzati al fine di limitare le emissioni di anidride carbonica.

I Criteri Ambientali Minimi, anche se aggiornati periodicamente, si basano però prevalentemente su stime di dati climatici storiche, che provengono ad esempio dalle osservazioni degli ultimi trent'anni, ma alla luce della crisi climatica, risulta essere urgente cercare il modo di implementare

[35] Le valutazioni multicriterio sono metodologie di supporto alle decisioni che permettono di analizzare e confrontare alternative complesse in presenza di più criteri, spesso tra loro eterogenei (ambientali, economici, sociali e tecnici) ma consentono anche di utilizzare pesi diversi per ciascun criterio in base alla sua unità di misura ed importanza.

questi criteri con dati climatici futuri per provare a ridurre le emissioni tenendo conto di scenari di impatto orientati verso il lungo termine, come viene esplicitato dalla normativa e dai documenti ministeriali stessi.

L'integrazione di dati climatici previsionali, derivati da modelli aggiornati, può rafforzare la capacità di progettare in modo da anticipare e mitigare i futuri effetti del cambiamento climatici, per avere edifici che non rispondono solo alle richieste della normativa attuale ma a quelle che saranno le esigenze climatiche future, soprattutto in determinati ambiti che potrebbero essere critici come: la ventilazione naturale ed il *comfort* estivo, la gestione intelligente delle risorse idriche, la durabilità dei materiali e la diminuzione dell'effetto isola di calore [39].

1.4 Certificare la sostenibilità

La crescente attenzione verso gli impatti ambientali del settore edilizio rendono oggi imprescindibile l'adozione di strumenti in grado di valutare in maniera oggettiva la sostenibilità delle costruzioni. In questo contesto si collocano sia i quadri metodologici europei, come *Level(s)*, sia i principali protocolli di certificazione ambientale, che offrono

indicatori e procedure utili a supportare i progettisti nelle fasi di pianificazione, progettazione e gestione. Questi strumenti consentono non solo di misurare le prestazioni energetiche, ambientali e di benessere interno, ma sempre più spesso integrano dati climatici attuali e futuri, riconoscendo l'importanza dell'adattamento ai cambiamenti climatici e dell'approccio basato sul ciclo di vita. I paragrafi seguenti approfondiranno il quadro *Level(s)* e i principali protocolli di sostenibilità, evidenziandone il ruolo nel guidare una progettazione orientata alla durabilità, all'efficienza e alla resilienza.

1.4.1 Indicatori di sostenibilità Level(s)

Il quadro metodologico di riferimento per gli indicatori di sostenibilità *Level(s)* è uno strumento strategico volontario ma promosso e normativamente riferito dall'Unione Europea, risulta essere in accordo con la visione del *Green Deal* e viene utilizzato come elaborato a supporto della Tassonomia Europea, la quale stabilisce che gli investimenti sostenibili sono quelli che contribuiscono ai sei obiettivi ambientali.

Il documento "Un quadro di riferimento comune dell'UE per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio. Manuale utente 1: Introduzione al quadro comune *Level(s)*" [36], redatto

[36] Nicholas Dodd, Donatello Shane, and Mauro Cordella, *Level(s) – Un quadro di riferimento comune dell'UE per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio. Manuale utente 1: Introduzione al quadro comune Level(s)* (versione 1.1), Commissione Europea, Centro Comune di Ricerca, gennaio 2021



Figura 7:
Schema riassuntivo del funzionamento dello strumento volontario Level(s) per analisi di sostenibilità.

[37] L'economia circolare è un sistema economico che punta a minimizzare gli sprechi e massimizzare il riutilizzo e il riciclo delle risorse, creando un ciclo di vita più lungo per i prodotti e i materiali. Invece di un modello lineare (estrazione, produzione, consumo, smaltimento), l'economia circolare mira a mantenere le risorse in circolazione il più a lungo possibile.

dall'Unione Europea, esplicita la natura del quadro di riferimento **Level(s)**, ovvero quella di uno strumento volontario ma non per questo di semplice stesura. La procedura è particolarmente strutturata e vuole cercare di passare da una visione frammentata dei diversi impatti e della sostenibilità edilizia ad una visione integrata d'insieme; infatti, viene applicata a partire dal concetto di ciclo di vita quindi dalle fasi iniziali di pianificazione e progettazione, a quelle di uso effettivo fino alla dismissione e fine vita del bene preso in considerazione.

In ottica quindi di ragionare sempre secondo un ciclo di vita utile dell'edificio, viene introdotto un pensiero che si discosta dal pensiero lineare dell'economia e dell'edilizia ma entra a far parte di un progetto circolare [37] e rigenerativo; infatti, ogni fabbricato non è visto solo come un oggetto in sé ma come un potenziale deposito di materiali e risorse, riutilizzabili dopo il fine vita dell'edificio stesso.

Level(s) viene pensato come modello di supporto per tecnici e professionisti per la pianificazione, progettazione, finanziamento ed esecuzione dei progetti, cercando di identificare un linguaggio comune di parametri ed indicatori che misurino le prestazioni di sostenibilità dei fabbricati e valutando quindi tematiche come: le prestazioni ambientali, salute e

benessere, costo e valore del ciclo di vita e potenziali rischi per le prestazioni future. Questa ultima tematica assume particolare importanza in un'ottica di elaborazioni di set di dati climatici futuri per progettare e ristrutturare edifici che siano sempre più resilienti.

Come detto in precedenza, **Level(s)** condivide totalmente i sei obiettivi ambientali della Tassonomia UE elencati all'interno del paragrafo 1.3 di questo elaborato di tesi, in particolare i temi che risultano interessanti maggiormente per la trattazione del tema dei dati climatici futuri sono l'adattamento ai cambiamenti climatici e l'uso sostenibile delle risorse. Ad ogni macro-tema, sempre secondo quanto detto all'interno del manuale per l'utente sul quadro comune **Level(s)**, vengono associati degli indicatori più specifici, per un totale di 16 indicatori principali, di cui tre appartengono al quinto obiettivo dell'adattamento cambiamento climatico e sono: la protezione della salute del **comfort** termico dell'occupante, rischio di eventi atmosferici estremi e rischio di eventi di piena.

Uno degli aspetti distintivi del quadro di valutazione è sicuramente l'utilizzo delle analisi LCC (**Life Cycle Costing**), che quantifica principalmente gli impatti economici di un determinato intervento e LCA (**Life Cycle Assessment**), che invece stabilisce gli impatti ambientali riferiti ad un

certo fabbricato, ma ha anche il ruolo di determinare i punti critici del progetto per utilizzarli come punto di partenza per cercare di migliorarne le prestazioni.

Oltre a prendere in considerazione quindi l'intero ciclo di vita di un edificio, l'analisi di sostenibilità può essere svolta con tre diversi gradi di approfondimento, in particolare il primo livello determina solamente valutazioni quantitative per la fase di progettazione, il secondo livello invece comporta sempre una valutazione quantitativa ma sia della fase di progetto che di quello di costruzione e di cantiere, mentre il terzo livello, quello più completo, determina il monitoraggio ed il rilevamento delle prestazioni dell'edificio in fase di costruzione ma anche in fase di utilizzo e mantenimento.

Come visto il documento spesso fa riferimento all'utilizzo di dati climatici ed ambientali, per esempio, a riguardo delle emissioni di anidride carbonica equivalente, a indicatori di *comfort* termico con riferimento a scenari futuri, all'inclusione di studi sul cambiamento climatico nelle valutazioni LCA, e al monitoraggio delle condizioni ambientali per valutare ad esempio la qualità dell'aria interna. Per quanto riguarda gli scenari futuri, viene fatto un approfondimento nel paragrafo 4.1 del manuale [38] in cui viene esplicitato che con il termine scenario si intendono sia proiezioni

future del profilo di utilizzo degli ambienti dell'edificio, sia come il cambiamento climatico possa influenzare gli impatti dell'edificio durante l'intero ciclo di vita utile.

Gli scenari devono quindi indicare: la quantificazione della vita utile del fabbricato prima che necessiti di manutenzione straordinaria, la variazione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento ed il riscaldamento dovuta alla variazione del clima, la stimata diminuzione delle emissioni di anidride carbonica, dovute ad una maggiore produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e livello Europeo, la scelta di una progettazione adattiva e resiliente per determinare una maggiore vita utile dell'edificio e determinare come un fine vita progettato adeguatamente possa ridurre la quantità di rifiuti prodotti per lo smaltimento del fabbricato.

Concludendo, il documento tratta ripetutamente temi legati al cambiamento climatico e alla sostenibilità ambientale, fornendo strumenti, indici ed indicatori specifici per integrare questi aspetti nella progettazione e nella gestione degli edifici futuri, mettendo anche l'accento sul fatto che edifici più efficienti e sostenibili, secondo tutti gli aspetti elencati precedentemente, possano essere valutati in modo migliore e più accurato all'interno del mercato immobiliare.

[38] Dodd, Nicholas, Shane Donatello, and Mauro Cordella, *Level(s) – Un quadro di riferimento comune dell'UE per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio. Manuale utente 1: Introduzione al quadro comune Level(s)* (versione 1.1), Commissione Europea, Centro Comune di Ricerca, gennaio 2021.

1.4.2 Protocolli di sostenibilità

La progettazione sostenibile si avvale di sistemi di certificazione ambientale per i materiali e gli edifici che rappresentano degli strumenti tecnici ed operativi per valutare in primo luogo e comunicare in seguito le prestazioni ambientali di un certo progetto.



I principali protocolli utilizzati a livello internazionale sono la certificazione LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), tradotto promotore nella progettazione energetica e ambientale, la certificazione BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), Metodo di valutazione ambientale dell'istituto di ricerca edilizia ed il Protocollo Itaca. In particolare, sono importanti per la trattazione di questo elaborato perché, oltre a stabilire criteri di valutazione per la sostenibilità, per i materiali e per il comfort interno degli ambienti, questi sistemi stanno progressivamente integrando dati climatici attuali e previsionali al fine di guidare la progettazione in un'ottica di adattamento climatico e resilienza.

La certificazione LEED, secondo quanto riassunto nell'articolo "Uno strumento per la creazione di valore nella realizzazione di edifici sostenibili: la certificazione LEED" [39], viene

sviluppata dal *U.S. Green Building Council* che lancia il primo protocollo LEED nell'anno 2000: un programma del tutto volontario basato su 4 livelli di sostenibilità che prendono il nome di *Certified, Silver, Gold e Platinum*, ovvero certificato, argento, oro e platino, nominativi che vengono attribuiti in base al punteggio raggiunto. Il punteggio riguarda differenti categorie tra cui: selezione del sito e trasporti, sostenibilità del sito, efficienza idrica, energia e atmosfera, materiali e risorse, qualità ambientale interna, che vengono esaminate sia per edifici di nuova costruzione che edifici già esistenti.

LEED promuove l'impiego di strumenti progettuali e gestionali volti al contenimento dei consumi energetici e idrici, all'incremento dell'efficienza nell'uso delle risorse, e alla realizzazione di ambienti salubri per gli utenti. In linea con i principi della sostenibilità, inoltre valorizza l'utilizzo della luce naturale, favorisce il raggiungimento di una buona qualità dell'aria interna e incoraggia l'impiego di materiali atossici, con basso o nullo contenuto di COV (Composti Organici Volatili). Tali strategie contribuiscono a creare ambienti più sicuri e salutarì, con effetti positivi anche sulla prevenzione di alcune patologie, migliorando il benessere generale degli occupanti.

Con il passare degli anni USGBC ha studiato e

[39] S. Rick Fedrizzi, Giacomo Morri, Angela Silvia Pavesi, Federico Soffietti, Elena Verani, *Uno strumento per la creazione di valore nella realizzazione di edifici sostenibili: la certificazione LEED*, Territorio Italia, 1(1), Articolo 3. DOI: 10.14609/Ti_1_14_3i.

promosso nuove versioni della certificazione LEED, fino a LEED v4 che amplia le tipologie edilizie che si possono certificare includendo quelle di settori di mercato come magazzini e centri logistici, supporta la stesura del documento con video e *tutorial* descrittivi, ma soprattutto inserisce all'interno della valutazione nuove categorie di impatto ambientale che prendono in considerazione anche gli impatti differenti dovuti al cambiamento climatico in atto, la salute degli individui, la gestione di risorse idriche e la biodiversità.

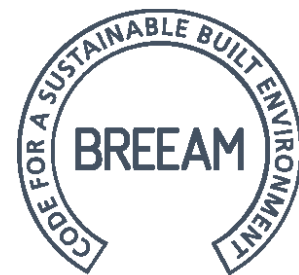
La certificazione BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) viene introdotta per la prima volta nel Regno Unito nel 1990 dal BRE Group (*Building Research Establishment*) e fornisce un metodo di valutazione volontario per le performance ambientali durante tutto il ciclo di vita utile. Nel manuale tecnico "BREEAM *International New Construction 2016*" [40], il sistema presenta la possibilità di ottenere un determinato numero di crediti a seconda di criteri prestazionali legati alle seguenti categorie: gestione (MAN), salute e benessere (HEA), energia (ENE), trasporti (TRA), acqua (WAT), materiali (MAT), rifiuti (WST), uso del suolo ed ecologia (LE), inquinamento (POL), innovazione (INN).

A differenza della certificazione LEED in cui

l'integrazione dell'analisi con dati climatici viene utilizzata solo per specifici progetti e non è obbligatoria, all'interno del protocollo BREEAM, l'uso di file di dati climatici attuali deve sempre essere accompagnato, secondo quanto riportato nel manuale tecnico citato in precedenza, da proiezioni di dati climatici futuri che abbiano le variabili di temperatura esterna, velocità del vento, radiazione solare e copertura nuvolosa riportate all'interno di file orari.

I dati devono basarsi su scenari futuri che tengano conto del cambiamento climatico e i dati devono essere generati tramite strumenti come *Weathershift, Meteonorm, CCWorldWeatherGen, Climate Change World Weather File Generator o ASHRAE weather data*; in particolare, per l'analisi del criterio HEA 04, relativo al *comfort* termico, il riscaldamento può essere dimensionato usando le condizioni invernali attuali mentre l'impianto di raffrescamento deve essere pensato in base alle ondate di calore future.

Il Protocollo ITACA (Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale) viene sviluppato a partire dal 2004 ed è uno strumento di valutazione di sostenibilità multicriterio, che vuole valutare le prestazioni energetiche ed ambientali degli edifici attraverso un approccio oggettivo e comparabile che si fonda sui principi di



[40] BRE Global Ltd, *BREEAM International New Construction 2016: Technical Manual SD233*, Watford: Building Research Establishment, 2016.

trasparenza e adattabilità al contesto locale. Tutti e tre le certificazioni descritte sono quindi criteri volontari e possono essere integrate nella stesura della relazione CAM come strumenti a supporto di quest'ultima e la rendono un'analisi più solida.



Il Protocollo ITACA [41], secondo quanto descritto nel documento ufficiale *“Protocollo ITACA: per la valutazione della qualità energetica e ambientale di un edificio”*, richiede l'utilizzo di dati climatici per valutare il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento, l'efficienza degli impianti e il bilancio idrico; attualmente sono necessari dati attuali, che provengono da elaborazioni storiche, forniti da fonti ufficiali a livello nazionale come il CTI (Comitato Termotecnico Italiano) o ENEA e che devono essere coerenti e rispettare le zone climatiche definite dalla normativa italiana.

Il protocollo ITACA, infatti, nella versione del documento del 2004 non obbliga all'utilizzo di elaborazioni di dati climatici futuri o scenari di cambiamento climatico, ma le evoluzioni successive del protocollo, o le sue integrazioni in strategie regionali e piani di adattamento climatico, potrebbero considerare l'adattamento ai cambiamenti climatici come criterio progettuale (es. resistenza a ondate di calore, eventi estremi, ecc.).

[41] Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale (ITACA), *Protocollo ITACA: per la valutazione della qualità energetica e ambientale di un edificio*, Roma, 15 gen. 2004.

Nel capitolo precedente è emerso come la crescente necessità di progettare edifici resilienti agli effetti del cambiamento climatico, determina l'importanza della creazione di previsioni realistiche ed accurate di **dataset** di dati climatici futuri, infatti, stime errate o incomplete possono portare il progettista ad elaborare soluzioni architettoniche anacronistiche e potenzialmente dannose per gli occupanti e per l'ambiente. Quindi le proiezioni future, basate su scenari di emissione e modelli climatici, sono fondamentali per orientare le politiche di mitigazione e adattamento, descritte in precedenza, sebbene siano, in ogni caso, soggette a un certo grado di incertezza, soprattutto a causa della variabilità dei comportamenti umani e della complessità delle interazioni tra atmosfera e gas serra.

Il presente capitolo vuole analizzare i principali strumenti e modelli utilizzati per l'elaborazione di dati climatici futuri, con particolare riferimento ai dati utili alla progettazione energetica degli edifici. La disponibilità di proiezioni climatiche affidabili è infatti fondamentale

per comprendere del clima potranno influenzare le condizioni ambientali locali e, di conseguenza, le esigenze energetiche e il **comfort** termoisolmetrico negli edifici del futuro.

In primo luogo, verrà trattato il tema degli scenari di emissione, analizzando come questi si siano aggiornati e trasformati nel tempo, pur rimanendo il punto di partenza imprescindibile per fare considerazioni sull'evoluzione del clima futuro e sul comportamento antropico. Si passerà poi alla descrizione dei modelli climatici atmosferici, considerando sia quelli a scala globale (GCM – **Global Climate Models**), capaci di simulare le dinamiche del sistema climatico terrestre nel suo complesso, sia quelli a scala regionale (RCM – **Regional Climate Models**), in grado di fornire informazioni più dettagliate su specifiche aree geografiche.

Il tema principale del capitolo sarà infine l'analisi dei metodi di **downscaling**, sia statistico che dinamico; infatti, il **downscaling** rappresenta un insieme di tecniche finalizzate a tradurre i risultati dei modelli climatici globali, che operano con

una risoluzione spaziale relativamente grossolana (generalmente dell'ordine di poche centinaia di chilometri), in informazioni più dettagliate e localizzate, utili per applicazioni a scala locale come la progettazione edilizia. Questi metodi permettono di ottenere dati climatici futuri con un grado di dettaglio più elevato, rendendo possibile una valutazione più precisa degli impatti climatici a scala urbana o addirittura edilizia, e sono pertanto strumenti necessari per lo sviluppo di strategie di adattamento e progettazione resiliente nel settore delle costruzioni.

2.1 Scenari di emissione di CO₂

Il primo passo per poter sviluppare delle previsioni future sui dati climatici è cercare di capire come si modificherà il comportamento dell'uomo e di conseguenze delle emissioni di gas serra, climalteranti, dato che l'insieme delle attività antropiche è la causa

principale del cambiamento climatico in atto. In questo campo, l'IPCC (*Intergovernmental Panel for Climate Change*) rappresenta l'ente di riferimento per quanto riguarda la definizione di scenari di emissione futuri, ovvero delle proiezioni di emissione di gas serra che si basano su variabili socioeconomiche per quantificare l'impatto dei presenti e futuri cambiamenti climatici. Questi scenari, quindi, non sono previsioni infondate, bensì ipotesi coerenti, basate su studi di natura demografica, economica, tecnologica, istituzionale e politica di come potrebbero evolvere le emissioni di gas ad effetto serra (GHG [42]) in futuro.

Il primo set di scenari è stato introdotto nel rapporto di valutazione dell'IPCC [43] del 1990, e rappresenta la rielaborazione di una serie di proiezioni sviluppate nel 1989 da un gruppo di lavoro congiunto Stati Uniti – Paesi Bassi. Lo scenario principale, secondo quanto emerge dal rapporto, è chiamato SA90 ed ipotizza l'assenza di interventi di politica climatica, come ad esempio l'applicazione di strategie per la decarbonizzazione, ed include invece l'impatto delle emissioni di anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O)₂, alocarburi e precursori dell'ozono troposferico (come NO_x e CO); risulta quindi essere una proiezione *“business-as-usual”* (una previsione di come si evolverà una situazione o un sistema senza cambiamenti

significativi rispetto alle politiche, abitudini o tendenze attuali) che ipotizza un continuo aumento delle emissioni secondo i livelli del 1990, e che si basa su dati disponibili all'epoca spesso incerti ed obsoleti.

Nel biennio successivo a questo rapporto era evidente fosse necessaria una revisione dei dati generati anche a fronte di nuovi campi di indagine e sviluppo che erano emersi in quei due anni e che vengono espressi all'interno di un nuovo rapporto pubblicato dell'IPCC [44] nel 1992, il quale elenca appunto i motivi che hanno portato all'aggiornamento dei precedenti scenari, ovvero:

- lo sviluppo di nuove proiezioni di popolazione da parte delle Nazioni Unite
- la revisione dei dati FAO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura) riguardo ai cambiamenti nell'estensione delle foreste nel mondo, con particolare attenzione alla perdita di copertura forestale
- l'accadimento di eventi politici rilevanti come la dissoluzione dell'URSS e la guerra del Golfo
- una maggiore comprensione dell'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile pulita
- la stesura di modifiche al Protocollo di Montreal, ovvero gli emendamenti di Londra del 1990 che hanno l'obiettivo di rafforzare maggiormente le misure internazionali per la protezione dello strato di ozono.

Oltre a questi nuovi fronti di

[42] *“Greenhouse Gas”* in inglese. Questi sono gas presenti nell'atmosfera che contribuiscono all'effetto serra, intrappolando il calore e causando un aumento della temperatura globale.

[43] J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (a cura di), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), Cambridge, Cambridge University Press, 1990.

[44] J. T. Houghton, B. A. Callander, S. K. Varney, (a cura di), *1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), Cambridge University Press, 1992.

ricerca si tiene anche conto per la prima volta, di una serie di altre variabili aggiuntive quali: le stime delle emissioni di composti volatili organici (VOC) e ossidi di zolfo (SO_x), una più corretta rappresentazione delle emissioni da agricoltura e hanno un'espansione temporale fino all'anno 2100.

Gli scenari introdotti dal gruppo di lavoro dell'IPCC sono sei e sono noti come IS92a, IS92b, IS92c, IS92d, IS92e e IS92f, che hanno sostituito e ampliato SA90; in particolare IS92a viene considerato lo scenario principale, anche questo basato su una proiezione *“business-as-usual”*, su previsioni medie di crescita sia economica che demografica e parziale rispetto degli accordi presi nel Protocollo di Montreal, lo scenario IS92b invece tiene conto delle stesse assunzioni di quello precedente ma differisce per una maggiore aderenza agli accordi ambientali in atto a livello mondiale e considera quindi il totale rispetto del Protocollo di Montreal. Infine, gli scenari IS92c-d-e-f rappresentano varianti alternative in termini di popolazione, PIL (prodotto interno lordo), risorse fossili disponibili e diffusione di tecnologie pulite, in particolare la lettera c considera le più basse emissioni di CO_2 ed una crescita più lenta della popolazione, risultando quindi lo scenario più ottimistico, fino ad arrivare allo scenario peggiore ovvero il IS92f che assume una crescita massima della popolazione e le più elevate

emissioni di gas serra.

A partire dalla fine degli anni Novanta del secolo scorso, l'IPCC ha progressivamente aggiornato e raffinato il modo in cui costruire gli scenari di emissione, tenendo conto della crescente complessità delle dinamiche globali e della maggiore disponibilità di dati. Il primo passo significativo in questa direzione è stato rappresentato dal rapporto [45] pubblicato nel 2000: il SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) un rapporto speciale sugli scenari di emissione, che ha rappresentato punto di svolta nella modellazione delle traiettorie future del cambiamento climatico. La novità di questi scenari è che abbandonano il concetto di traiettorie future *“business-as-usual”*, e propongono invece, un ventaglio di opzioni future basate su diverse combinazioni di crescita economica, popolazione, uso dell'energia pulita, tecnologia e governance globale.

Gli scenari SRES sono suddivisi in 4 categorie principali: A1, A2, B1 e B2, ognuna delle quali rappresenta una tipologia distinta di un futuro globale, con ipotesi differenti in merito a crescita economica e demografica, grado di globalizzazione, tutela ambientale ed avanzamento tecnologico. In particolare, lo scenario A1 ipotizza una visione altamente globalizzata e caratterizzata da una crescita economica molto rapida, ma include alcune declinazioni,

[45] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change, Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*. Cambridge University Press, 2000.

ovvero dei sotto-scenari che si differenziano dalla fonte di energia prevalente che utilizzano, ad esempio A1FI (*A1 Fossil Intensive*), forte uso di combustibili fossili ed elevate emissioni di gas serra oppure A1T (*A1 Technology non-fossil*), energia prodotta con tecnologie pulite a basse emissioni. Al contrario, la categoria B1 rappresenta una traiettoria più sostenibile, in cui l'innovazione tecnologica e la cooperazione internazionale contribuiscono a ridurre la pressione sull'ambiente, pur mantenendo uno sviluppo economico sostenuto; lo scenario A2, invece, riflette una proiezione più frammentata, con forti disparità ed una crescita demografica più elevata, mentre quello B2 descrive uno sviluppo locale più sostenibile ma meno dinamico rispetto alla B1.

Nessuno di questi scenari, però, include politiche climatiche attive, infatti, l'idea è quella di fornire una base neutrale per la valutazione dei futuri impatti climatici in assenza di interventi correttivi, ma questo porta a scenari poco adatti a simulare effetti di azioni mirate alla mitigazione. A fronte di queste problematiche e limitazioni del documento degli anni 2000 viene fatto un ulteriore passo avanti dall'IPCC, che nel 2014 pubblica il Quinto Rapporto di Valutazione [46]; con questo documento l'attenzione viene spostata da aspetti più socioeconomici a tematiche più di carattere energetico come la forzante radiativa,

ovvero la quantità di energia in eccesso in un sistema, che si accumula nell'atmosfera a causa dell'effetto serra. Questo documento, quindi, introduce gli scenari RCP (*Representative Concentration Pathways*), nello specifico RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 dove i valori numerici indicano appunto il livello di forzante radiativa previsto per la fine del secolo espresso in Watt per metro quadro.

Lo scenario RCP2.6 rappresenta lo scenario più ottimista con un'ipotesi di forte mitigazione, dove le emissioni globali di gas serra raggiungono un picco precoce entro il 2020, per poi diminuire rapidamente grazie all'adozione di tecnologie a basse emissioni, all'efficienza energetica e a strategie di *carbon sequestration* [47]: viene esplicitato inoltre che questo è l'unica alternativa che permette di limitare il riscaldamento globale a meno di 2°C sopra i livelli preindustriali, obiettivo coerente con l'Accordo di Parigi. Gli scenari RCP4.5 e RCP6.0 invece, descrivono un percorso intermedio che tiene in considerazione politiche di mitigazione moderate, capaci di stabilizzare le emissioni entro la metà del secolo, con un graduale declino nella seconda metà ma in modo non sufficientemente rapido da rientrare nei limiti più stringenti della normativa vigente sulla limitazione del riscaldamento globale. Infine, il RCP8.5 rappresenta un caso estremo, in cui non vengono adottate nuove politiche per

[46] Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (AR5), *Quinto Rapporto di Valutazione, Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), Ginevra, Svizzera, 2014.

[47] "Sequestro e stoccaggio del carbonio": si fa riferimento alle tecniche utilizzate per rimuovere l'anidride carbonica dall'atmosfera per poi immagazzinarla in modo sicuro e duraturo. Questo processo può avvenire in modo naturale, come attraverso la riforestazione, o tramite tecnologie artificiali, come la cattura e lo stoccaggio del carbonio a profondità elevate.

ridurre le emissioni, e si continua a fare largo uso di combustibili fossili, questa ipotesi è stata spesso utilizzata come scenario di riferimento per valutare i rischi legati all'inazione climatica, poiché rappresenta una traiettoria ad alte emissioni e ad alti impatti, con temperature medie globali che potrebbero superare di molto i 4 °C rispetto all'epoca preindustriale entro fine secolo.

Tuttavia, per comprendere veramente come e perché un determinato livello di emissioni potrebbe verificarsi, era necessario riaccoppiare le condizioni climatiche e quindi le quantità di forzante radiativa agli sviluppi umani e sociali: e proprio per rispondere a questa esigenza che, l'IPCC introduce nel Sesto Rapporto di Valutazione [48], pubblicato tra il 2021 e il 2022, un sistema di scenari ancora più avanzato e flessibile: i cosiddetti SSP, ovvero *Shared Socioeconomic Pathways*. Questi scenari: SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5 possiedono caratteristiche ben definite in termini di **governance** globale, equità, accesso alla tecnologia, uso dell'energia, transizione ecologica e capacità di adattamento ai cambiamenti climatici. I percorsi SSP non sono associati automaticamente a un livello di emissioni: essi possono essere combinati con diversi RCP, costruendo così una matrice in cui si esplorano non solo le conseguenze fisiche del riscaldamento globale, ma anche

le condizioni socioeconomiche che potrebbero renderne più o meno difficile la gestione.

Ad esempio, lo scenario SSP1 descrive un futuro orientato alla sostenibilità, in cui le società collaborano, adottano rapidamente tecnologie pulite e attuano politiche efficaci per ridurre le disuguaglianze e proteggere l'ambiente. Questo scenario è spesso accoppiato a RCP molto bassi, come il 2.6. Al contrario, lo scenario SSP5, che ipotizza una forte crescita economica alimentata dai combustibili fossili e una fiducia quasi totale nella futura capacità tecnologica di rimediare ai danni ambientali, tende a essere accoppiato con RCP molto alti, come l'8.5, riflettendo un futuro con emissioni elevate e impatti climatici molto gravi.

2.2 Modelli climatici globali

Tutti gli scenari che sono stati descritti in precedenza, ma soprattutto quelli sviluppati più recentemente, non forniscono direttamente previsioni climatiche, ma rappresentano il punto di partenza per poter elaborare uno strumento molto importante ovvero i modelli climatici globali (GCM - *Global Climate Models*). Secondo quanto espresso nell'articolo *"Impacts of future weather data typology on building*

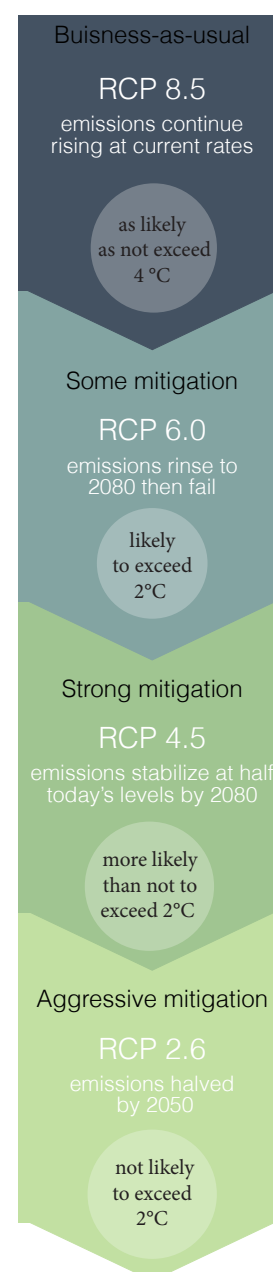


Figura 8: I quattro scenari RCP (Representative Concentration Pathway) prevedono ciascuno una certa quantità di carbonio da emettere entro il 2100 - adattato dall'IPCC AR5 (Symon, 2013)

[48] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change, Sesto Rapporto di valutazione (AR6)*, Svizzera, Ginevra, 2022.

energy performance Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions”, pubblicato da *Applied Energy* [49], i GCM sono modelli numerici avanzati che descrivono il funzionamento fisico del sistema climatico terrestre, simulando le interazioni tra atmosfera, oceani, superficie terrestre, ghiacci e biosfera; questi si basano su leggi fisiche fondamentali come la legge di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, ed hanno come input i dati che emergono dagli scenari di emissione futuri.

Per verificarne l'affidabilità, i GCM vengono prima testati su periodi del passato tramite confronti con dati osservati ed una volta validati, vengono utilizzati per proiettare l'evoluzione del clima futuro, a partire da condizioni iniziali definite e sotto l'influenza di uno specifico scenario emissivo, ad esempio, RCP4.5 o RCP8.5. Questi modelli, inoltre, suddividono l'intera superficie terrestre in una griglia tridimensionale composta da celle di dimensioni tra i 100 e 300 km, ed in ciascuna di queste viene calcolato il tempo di evoluzione di alcune variabili climatiche come la temperatura, la pressione, l'umidità relativa, la velocità del vento e la quantità di precipitazioni con intervalli temporali mensili o stagionali.

Negli ultimi anni, l'incremento della capacità di calcolo e l'accesso a grandi volumi

di dati osservativi, inclusi quelli derivati da satelliti e reti di monitoraggio atmosferico, ha permesso un notevole miglioramento nella precisione e nella complessità dei GCM, infatti, alcuni tra i modelli più recenti, includono anche componente socioeconomica, come l'uso del suolo, i cambiamenti nella copertura vegetale, le emissioni prodotte dalle attività antropiche e la gestione delle risorse naturali. Questa maggiore integrazione rende i modelli sempre più realistici e utili per supportare decisioni strategiche a livello internazionale, anche perché i GCM vengono costantemente aggiornati e migliorati sulla base delle nuove conoscenze scientifiche e osservazioni meteorologiche. Le principali istituzioni scientifiche che prendono parte nella revisione e aggiornamento di questi modelli sono: l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), l'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e il NASA GISS, enti che garantiscono una continua evoluzione e l'affinamento dei parametri fisici, la correzione di errori sistematici e la costante calibrazione su scala globale.

Un altro elemento centrale nell'impiego dei GCM è l'approccio *multi-modello*, dato che in ambito scientifico è prassi comune utilizzare insieme di simulazioni realizzate da diversi modelli sviluppati in centri di ricerca indipendenti; questo consente di analizzare non solo la traiettoria media di

[49] Amin Moazami, Vahid M. Nik, Salvatore Carlucci, Stig Gevin, *Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions*, Applied Energy, Vol. 238, Elsevier, 2019.

cambiamento climatico, ma anche la variabilità e l'incertezza associate. Grazie all'analisi di insieme, si possono identificare intervalli di probabilità per gli scenari futuri, migliorando l'affidabilità delle proiezioni e la gestione del rischio.

2.3 Modelli climatici regionali

Nonostante la loro complessità e accuratezza su scala globale, i GCM presentano una risoluzione spaziale e temporale ancora troppo esigua per applicazioni locali o settoriali, come ad esempio l'analisi dell'efficienza energetica degli edifici, la pianificazione urbana o la gestione delle risorse idriche, infatti, le simulazioni prodotte dai GCM operano generalmente basandosi su celle di una griglia con dimensioni di qualche centinaia di chilometri e forniscono risultati su base mensile o stagionale, risultando quindi insufficienti per descrivere in modo realistico le dinamiche climatiche a livello locale o con un dettaglio temporale più fine.

Per colmare questa lacuna, si ricorre a una tecnica chiamata *downscaling*, che consente di “tradurre” le informazioni provenienti dai modelli globali, fino ad arrivare a dei modelli climatici regionali (RCM - *Regional Climate Model*) migliorando significativamente sia la risoluzione spaziale fino ad arrivare a pochi

chilometri, ma anche la risoluzione temporale arrivando in alcuni casi fino al profilo orario. Questo processo permette di ottenere dataset climatici coerenti e rappresentativi delle condizioni microclimatiche di un'area specifica, utili per alcune applicazioni, tra cui la generazione di file meteorologici futuri, indispensabili per la progettazione e il collaudo di edifici, infrastrutture e sistemi energetici in un contesto di cambiamento climatico.

Il *downscaling* può essere di due tipologie: statistico, se basato su relazioni tra clima locale e globale, o dinamico, se utilizza modelli regionali del clima (RCM - *Regional Climate Models*) annidati nei GCM. Entrambi gli approcci sono oggi ampiamente utilizzati, anche in combinazione, specialmente nei progetti di valutazione del rischio climatico o per modellare correttamente la risposta del clima a piccola scala, soprattutto in territori con morfologia complessa come aree montuose, regioni costiere o zone densamente urbanizzate, dove le condizioni climatiche possono variare significativamente anche su brevi distanze.

2.3.1 Statistical Downscaling

Un altro metodo, oltre a quello del *downscaling* dinamico descritto in precedenza, per trasformare le informazioni climatiche su larga scala fornite dai GCM

in dati più dettagliati e localizzati è il *downscaling* statistico: questo approccio si basa sull'identificazione di relazioni statistiche tra le variabili climatiche su larga scala (provenienti dai modelli globali) e quelle locali, attraverso modelli deterministici o stocastici. Tali relazioni vengono poi calibrate su dati osservativi storici permettendo la generazione di serie temporali di dati compatibili con il clima locale e adattabili anche a scenari futuri.

I principali vantaggi di questo approccio sono sicuramente una maggiore semplicità e chiarezza computazionale, rispetto ai processi di elaborazione molto onerosi del sistema dinamico, inoltre i metodi statistici possono produrre dati che appartengono una scala di complessità molto varia e quindi essere molto versatili e diversificati per adattarsi a più scopi specifici. In aggiunta si può notare che le informazioni climatiche possono essere prodotte ed estrapolate per quasi la totalità delle località e che la stessa procedura di calcolo di variabili climatiche può essere riutilizzata e riprodotta in aree geografiche distinte con relativa semplicità; a ciò si aggiunge che i tools online, sia open source che a pagamento, per la produzione di dati climatici futuri con un metodo di *downscaling* statistico possono essere utilizzati facilmente da tutti i tipi di utente.

Tuttavia, il *downscaling* statistico presenta anche

alcune criticità come, per esempio, la qualità e la scarsa disponibilità, in alcuni casi, dei dati osservativi: in alcune aree del mondo, soprattutto in quelle meno monitorate o remote, possono mancare serie storiche affidabili e complete, che possono compromettere l'efficacia del modello statistico, inoltre, questo approccio si basa sull'ipotesi di stazionarietà, ovvero sul presupposto che le relazioni statistiche osservate tra la scala globale e la scala locale rimangano valide anche in futuro, ma in uno scenario di rapido cambiamento climatico, a cui stiamo assistendo ai giorni nostri, questa assunzione può risultare poco realistica e introdurre significative incertezze. Un'ulteriore limitazione riguarda la risoluzione temporale, poiché alcuni metodi, specialmente quelli più semplici, sono in grado di produrre dati solo su base mensile, risultando quindi poco adatti per applicazioni che richiedono dettaglio orario o giornaliero, come le simulazioni energetiche degli edifici.

Nonostante qualche punto di sfavore, il **downscaling** statistico risulta essere largamente utilizzato come metodologia di produzione di dati climatici futuri: tra le principali tipologie di approcci statistici impiegati si possono distinguere i metodi stocastici, che utilizzano modelli probabilistici per generare nuove serie temporali coerenti con le caratteristiche climatiche locali, e quelli basati sul **Morphing**

che consistono nella trasformazione di dati climatici esistenti attraverso l'applicazione di variazioni derivate da scenari futuri. Questi approcci, sebbene differenti, condividono l'obiettivo comune di adattare in modo efficace i dati climatici globali alle esigenze delle analisi su scala locale.

2.3.1.1 Metodo stocastico

All'interno dell'approccio statistico, il **downscaling** stocastico (aggettivo che si riferisce a fenomeni casuali o probabilistici, anziché deterministici), come suggerisce il termine stesso, si distingue per la sua capacità di generare modelli statistici che ricreino la forte variabilità naturale dei fenomeni atmosferici, in modo quasi del tutto realistico, inoltre all'interno dell'articolo "*Impacts of future weather data typology on building energy performance Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions*", [50] viene esplicitato come questi strumenti statistici vengono utilizzati per colmare alcune lacune nella produzione di dati climatici presenti e futuri e produrre serie di dati sintetici a lunga durata, ovvero dati che non corrispondono a eventi reali passati, ma riproducono le stesse caratteristiche statistiche come media, varianza, stagionalità, frequenza degli eventi estremi, dei dati osservati, quindi risultano realistici ma non identici al passato.

Il **downscaling** stocastico

[50] Amin Moazami, Vahid M. Nik, Salvatore Carlucci, Stig Gevin, *Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions*, Applied Energy, Vol. 238, Elsevier, 2019.

costituisce una metodologia efficace e flessibile per produrre dati climatici ad alta risoluzione, a partire da informazioni su scala più ampia, come quelle fornite da modelli climatici globali (GCM) o regionali (RCM); questa tecnica è particolarmente utile in contesti in cui si desidera simulare la variabilità climatica naturale, soprattutto per quanto riguarda eventi meteorologici estremi o distribuzioni spaziali della precipitazione, in quanto, il metodo stocastico non produce una singola simulazione, ma un insieme di scenari climatici plausibili, tenendo conto dell'incertezza insita nei fenomeni atmosferici.

Riassumendo, i vantaggi principali di questo approccio sono, in primis, l'efficienza computazionale: è possibile generare numerosi set di scenari climatici futuri con un consumo di risorse relativamente contenuto, inoltre, il metodo è altamente flessibile, adattabile a diversi contesti geografici e scale temporali, e consente di introdurre variabilità realistica a scale che i modelli dinamici non riescono a risolvere. Tuttavia, non mancano le limitazioni, poiché l'efficienza di questo processo dipende fortemente dalla disponibilità di dati osservativi e dalla loro affidabilità; infatti, i dati necessari per calibrare i modelli stessi, spesso devono essere registrazioni su base giornaliera o oraria. In aggiunta, le relazioni statistiche che legano variabili su larga e piccola scala sono assunte

stazionarie nel tempo, il che può rappresentare un limite in presenza di cambiamenti climatici significativi ed infine, queste simulazioni stocastiche, tendono a sottostimare gli eventi estremi a meno che non vengano implementati moduli specifici per la loro rappresentazione.

All'interno dell'articolo "*Stochastic downscaling of gridded precipitation to spatially coherent subgrid precipitation fields using a transformed Gaussian model*" [51] viene descritta la relazione tra *predictors* e *predictands*, alla base del *downscaling* stocastico: i *predictors* sono variabili climatiche su larga scala che vengono estrapolate dai modelli climatici globali o da dataset di rianalisi; queste variabili possono includere temperatura in quota, pressione atmosferica o velocità del vento, rappresentano la "forzante" del sistema climatico, invece, i *predictands* sono le variabili locali che si vogliono simulare, come la precipitazione giornaliera, la temperatura a livello del suolo o la durata di eventi piovosi. Il processo di *downscaling* consiste nell'identificare e modellare una relazione statistica tra queste due categorie e partendo dalle condizioni generali su larga scala, viene generata una rappresentazione probabilistica delle condizioni locali.

Nel documento viene proposto un nuovo approccio di *downscaling* stocastico per migliorare la rappresentazione delle precipitazioni

[51] M. Switanek, D. Maraun, E. Bevacqua, *Stochastic downscaling of gridded precipitation to spatially coherent subgrid precipitation fields using a transformed Gaussian model*, International Journal of Climatology, vol.42, n.13, 2022.

su scala locale con l'obiettivo di superare una delle limitazioni più frequenti nei metodi tradizionali: la tendenza a trattare ogni punto di osservazione in modo indipendente, trascurando del tutto le relazioni spaziali tra diverse località. Il metodo presentato nello studio si basa su un modello stocastico di tipo gaussiano trasformato, in grado di generare campi di precipitazione coerenti nello spazio e nel tempo. Questo approccio lavora in due fasi: prima corregge gli errori sistematici (*bias*) presenti nei dati dei modelli climatici, e successivamente applica una procedura probabilistica per creare simulazioni locali che riproducono fedelmente le caratteristiche statistiche delle precipitazioni osservate, come la frequenza dei giorni di pioggia, la durata dei periodi secchi, l'intensità degli eventi estremi e soprattutto la loro distribuzione nello spazio.

Un aspetto particolarmente innovativo di questo lavoro è la sua capacità di simulare contemporaneamente più stazioni meteorologiche mantenendo tra esse la corretta dipendenza spaziale e ricostruisce in modo accurato non solo i valori medi delle precipitazioni, ma anche le proprietà più complesse come la coerenza spaziale e la probabilità di eventi estremi che colpiscono simultaneamente più aree. Inoltre, il metodo si è dimostrato stabile anche quando applicato a scenari futuri derivati da modelli climatici, il che lo rende uno

strumento promettente per valutare gli impatti del cambiamento climatico a livello locale.

Tra gli strumenti più noti per l'applicazione di questa metodologia figura **Meteonorm**, un software ampiamente utilizzato in ambito energetico, agricolo e ambientale, questo rappresenta una piattaforma integrata che combina un database climatico globale, un sistema di interpolazione spaziale e un generatore meteorologico stocastico. **Meteonorm** è in grado di produrre dati meteorologici orari o giornalieri per qualsiasi località del mondo, sia in condizioni climatiche storiche sia sulla base di scenari di cambiamento climatico, utilizzando le proiezioni dei modelli climatici globali (GCM). I principali vantaggi sono quindi una notevole semplicità d'uso ed un'elevata compatibilità con altri software di calcolo di variabili meteorologiche e calcoli energetici, queste caratteristiche, infatti, lo rendono uno strumento estremamente versatile.

Altri strumenti molto diffusi e utilizzati sono:

- **LARS-WG**: un generatore sequenze giornaliere di variabili climatiche (come precipitazione e temperatura) ed è apprezzato per la sua semplicità e applicabilità a diversi climi.

- **AWE-GEN**: un modello più avanzato, che simula molteplici variabili climatiche con risoluzione sub-giornaliera, indicato per studi su eventi estremi e applicazioni urbane.

- **RainFARM**: uno strumento innovativo che riproduce campi di precipitazione realistici ad alta risoluzione, ed è molto usato in ambito idrologico.

- **Bartlett-Lewis**: un modello che genera serie orarie a partire da dati giornalieri, utile in progettazione idraulica e simulazioni di eventi intensi.

- **WeaGETS**, **ClimGen** e **CLIGEN**: altri strumenti di generazione di dati climatici, ciascuno ciascuno con specifici punti di forza in ambito agricolo, ambientale o idrologico.

Come si è potuto notare, le applicazioni del **downscaling** stocastico sono numerose e trasversali, ad esempio in ambito idrologico viene largamente utilizzato per generare campi di precipitazione coerenti, migliorando la modellazione delle portate e la stima dei volumi di acqua durante eventi critici, ma anche in ambito urbano o agricolo, consente di simulare scenari climatici dettagliati per la pianificazione di infrastrutture resilienti o la gestione delle risorse idriche. In aggiunta, anche per quanto riguarda la progettazione resiliente questi dati climatici possono essere estremamente utili per lo studio di una progettazione adattiva a lungo termine dell'involucro e degli impianti.

2.3.1.2 Metodo Morphing

Per poter descrivere al meglio il metodo **Morphing** è necessario prima di tutto

parlare dei *Typical Meteorological Year* (TMY), ovvero dei file climatici composti da 8760 ore ciascuno (una per ogni ora dell'anno) selezionate da una serie storica di almeno 10-30 anni. Il TMY non rappresenta un anno realmente accaduto, ma è un anno fittizio, costruito selezionando per ciascun mese, quello che statisticamente si avvicina di più alle medie climatiche di lungo periodo per quella località: in questo modo, il risultato fornisce un quadro "tipico" del clima locale, bilanciando giornate calde, fredde e intermedie, anche se vengono trascurati eventi estremi o variazioni interannuali.

Tuttavia, in un contesto di cambiamento climatico sempre più evidente, come descritto in precedenza, progettare edifici basandosi solo su dati medi storici può non essere la soluzione più attendibile; infatti, gli edifici progettati oggi dovranno essere operativi per decenni in condizioni ambientali significativamente diverse rispetto a quelle attuali. Per questo motivo, si rende necessario l'uso di file climatici rappresentativi del clima futuro, ovvero i *Future Typical Meteorological Year* (FTMY), file meteorologici orari che partono dai dati storici del TMY ma vengono modificati sulla base delle proiezioni climatiche fornite da modelli globali (GCM) o regionali (RCM). Uno dei metodi più semplici, ma al contempo tra i più efficaci e ampiamente utilizzati per generare questo tipo di file, è il metodo *Morphing*, che

adatta le condizioni storiche alle variazioni climatiche future previste, mantenendo la struttura temporale originale del dataset.

Il processo di *Morphing* viene sviluppato a partire dal 2005 dal climatologo e fisico dell'atmosfera Stephen E. Belcher, uno degli autori dell'articolo fondamentale di formalizzazione del metodo, che si intitola "*Constructing design weather data for future climates. Building Services Engineering Research and Technology*" [52]. Il metodo *Morphing* permette la creazione di dati climatici futuri applicando al TMY delle anomalie climatiche, ovvero le differenze tra i valori medi previsti per il futuro e quelli storici, calcolate per ciascuna variabile meteorologica rilevante tra le quali compaiono:

- La temperatura media, massima e minima giornaliera
- La radiazione solare globale orizzontale
- La copertura nuvolosa
- Le precipitazioni
- L'umidità relativa
- La pressione atmosferica al livello del mare
- La velocità del vento.

Le anomalie, citate precedentemente, chiamate anche "delta", sono derivate dalle differenze tra i risultati dei modelli climatici globali (GCM) o regionali (RCM), che simulano l'evoluzione del clima sotto diversi scenari emissivi (es. RCP 4.5, RCP 8.5 o SSP), e i valori del periodo di riferimento (TMY) infatti ogni GCM restituisce

[52] Belcher, S.E., Hacker, J.N. e Powell, D.S., *Constructing design weather data for future climates*, Building Services Engineering Research and Technology, vol.26, n. 1, 2005

una sua proiezione del futuro clima, e quindi produce un delta specifico per ogni variabile, mese e località. Questo significa che il risultato del *Morphing* dipende strettamente dal modello climatico scelto, dallo scenario di emissioni considerato e dal periodo temporale selezionato ad esempio 2030-2050 oppure 2070-2100.

Il metodo più noto, proposto da Belcher, Hacker e Powell, agisce sui file meteorologici orari attraverso tre trasformazioni fondamentali:

1. **Shift** o traslazione: aggiunge un cambiamento assoluto a una variabile

$$x'(t) = x(t) + x$$

dove:

$x(t)$ è il valore orario della variabile climatica nel file storico

x è l'anomalia assoluta prevista per il futuro (es. incremento della temperatura media mensile).

2. **Stretch** o scalatura: moltiplica il valore per un fattore

$$x'(t) = x(t) * (1 +)$$

dove:

è la variazione percentuale attesa

3. Combinazione di **shift e stretch**

$$x'(t) = [x(t) + x] * (1 +)$$

L'applicazione delle trasformazioni avviene per ciascun mese, adattando così il profilo orario del TMY alle

nuove condizioni previste, pur mantenendo la struttura temporale originale del file storico in modo da conservare la variabilità giornaliera e oraria tipica del clima locale, rendendo il file FTMY particolarmente utile per simulazioni energetiche che richiedano una buona risoluzione temporale. Un limite importante di questo approccio, però, è che non restituisce una proiezione degli eventi estremi futuri, come ondate di calore eccezionali o piogge torrenziali fuori scala, ma produce un *"anno medio futuro"* coerente con i cambiamenti climatici attesi. In altri termini, mantiene la struttura statistica e la variabilità intrinseca del TMY originale, senza introdurre nuove dinamiche estreme, diventando uno strumento valido per la valutazione di tendenze medie, ma meno adatto per analisi legate alla resilienza degli edifici a eventi climatici severi o fuori norma.

Per poter applicare le formule esplicitate in precedenza è necessario quindi disporre di modelli climatici globali o regionali che simulano l'andamento futuro delle principali variabili meteorologiche, sulla base di diversi scenari emissivi di gas serra, definiti dall'IPCC come ad esempio scenari RCP 4.5 o RCP 8.5. A partire da questi dati proiettati, strumenti dedicati consentono di generare file climatici orari coerenti con le condizioni climatiche future: uno dei più noti è *CCWorldWeatherGen*, un tool gratuito che applica

il morphing a file storici TMY utilizzando le anomalie climatiche simulate dal modello globale HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model version 3*), ovvero un processo associato allo scenario di emissione SRES A2, uno degli scenari *"business-as-usual"* definiti nei primi rapporti IPCC; questo strumento, sebbene utile e facilmente accessibile, si basa su modelli ormai superati e su una risoluzione spaziale piuttosto limitata.

Più aggiornato è invece *WeatherShift™*, una piattaforma commerciale che impiega un insieme di modelli climatici globali più recenti e utilizza gli scenari RCP (*Representative Concentration Pathways*) per il futuro, in particolare RCP 4.5 e RCP 8.5. *WeatherShift™* applica le trasformazioni non solo tramite il classico morphing deterministico, ma anche attraverso approcci statistici avanzati, come la modifica delle distribuzioni cumulative delle variabili climatiche, permettendo di generare proiezioni su più percentili (es. 5°, 50°, 95°). Entrambi gli strumenti producono file climatici compatibili con software di simulazione energetica come *EnergyPlus*, facilitando la valutazione delle prestazioni degli edifici in scenari climatici futuri, inoltre i file generati sono generalmente disponibili per differenti orizzonti temporali come ad esempio 2020-2050 o 2050-2080, consentendo un'analisi progressiva dell'evoluzione climatica e dei suoi effetti sul comportamento

energetico degli edifici.

2.3.1

Dynamical Downscaling

Il *Dynamical downscaling* risulta essere un processo molto complesso che porta ad ottenere dei dati ad una maggiore risoluzione sia spaziale che temporale rispetto alle informazioni presenti in un modello climatico globale; tuttavia, questo maggiore grado di dettaglio richiede l'introduzione di informazioni aggiuntive e dati di supporto che contribuiscono alla propagazione dell'incertezza già presenti nei GCM. I risultati finali possono quindi essere influenzati da imprecisioni intrinseche nei modelli climatici globali, le quali tendono ad amplificarsi nelle fasi successive di rianalisi: queste incognite riguardano in particolare la correlazione tra le variazioni di temperatura e fattori come lo sviluppo industriale ed economico e la quantità di emissioni di gas climalteranti.

Il processo di *downscaling* dinamico ha alla base un principio di nidificazione (*nesting*), ovvero ogni RCM viene elaborato a partire da un dominio geografico relativamente ristretto come un continente o una nazione che rappresenta un settore generato dalla griglia del GCM; il modello regionale utilizza come dati di ingresso le grandezze climatiche ai bordi del dominio e sfruttando le equazioni fisiche che si annidano in questo,

viene poi restituita l'evoluzione del clima nei punti all'interno della porzione terrestre di griglia presa in considerazione, fino ad arrivare ad una risoluzione spaziale che in alcuni casi può raggiungere i 2,5 km². Questa elaborazione avviene gradualmente, spesso passando per quanto riguarda il dettaglio temporale, da scale mensile e giornaliere a scale orarie, e consente di simulare fenomeni locali e sempre più dettagliati che i GCM non sono in grado di rappresentare: per esempio, la formazione di temporali convettivi, le brezze di valle e di mare, o le isole di calore urbano.

Come visto fino ad ora, un aspetto importante di questo processo è il trattamento dei *boundary conditions*: ovvero quelle variabili atmosferiche e di superficie che devono essere fornite al RCM e che vengono estratte lungo i bordi laterali della griglia, tra cui le informazioni sulla superficie inferiore (terreno o oceano), e in alcuni casi anche nella parte superiore dell'atmosfera. La corretta assimilazione e gestione di questi dati è fondamentale per garantire che il modello regionale rimanga "ancorato" alla realtà simulata dal GCM, pur sviluppando in modo indipendente i processi climatici locali.

Va però sottolineato che il *downscaling* dinamico, pur essendo uno strumento potente, presenta alcuni limiti, poiché risulta essere un sistema molto oneroso sia in termini economici che in



Figura 9:
Schema esplicativo di una metodologia generale di Downscaling.

termini tecnologici, infatti, una singola simulazione trentennale su un dominio continentale può richiedere settimane o mesi di calcolo su computer dedicati e uno spazio di archiviazione dei dati veramente elevato.

Nonostante le difficoltà descritte in precedenza, il **downscaling** dinamico risulta essere il punto di partenza per molti centri di ricerca che in Europa e nel mondo cercano di studiare e produrre delle proiezioni climatiche regionali e comprendere sempre meglio i cambiamenti climatici; tra i principali progetti europei, si distinguono PRUDENCE, ENSEMBLES, CLARIS e STARDEX, che hanno sviluppato strumenti e scenari climatici avanzati per supportare politiche ambientali e strategie di adattamento. Sul fronte extra-UE, progetti come NARCCAP in Nord America e AMMA in Africa hanno approfondito le dinamiche climatiche specifiche di quei territori, contribuendo a una visione globale e coordinata della variabilità e dei rischi climatici.

[53] Il WCRP, fondato nel 1980, è un ente che ha l'obiettivo di coordinare la ricerca scientifica internazionale sul clima per comprendere meglio il sistema climatico terrestre e supportare le azioni contro il cambiamento climatico

[54] Le *nature based solutions* sono introdotte dalla Commissione Europea per identificare strategie, azioni, interventi, basati sulla natura che forniscono servizi ambientali e vantaggi socio-economici capaci, se utilizzati.

Oltre a quelli già elencati, uno dei principali riferimenti europei per il **downscaling** dinamico dei dati climatici è rappresentato dal progetto EURO-CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment for Europe*), nato nell'ambito della rete internazionale CORDEX coordinata dal *World Climate Research Programme* (WCRP [53]). L'obiettivo del progetto è fornire una metodologia per comprendere

come le dinamiche climatiche attese possano incidere, in modo differenziato, su territori, città e insediamenti, attraverso simulazioni che vengono solitamente realizzate con risoluzioni spaziali di 12.5 km e in alcuni casi sono disponibili anche versioni a 2 o 5 km su domini più ristretti, che risultano particolarmente utili per studi a scala urbana o periurbana.

I dati regionali forniti da EURO-CORDEX come temperatura, precipitazione ed eventi estremi aiutano a valutare la vulnerabilità delle città future, orientando scelte progettuali in chiave **climate-proof**, o orientando i progetti verso strategie di **nature based solutions** [54]. A livello edilizio, questi dati possono alimentare modelli energetici e microclimatici per simulare le prestazioni future degli edifici, facilitando strategie bioclimatiche e soluzioni passive. Infine, EURO-CORDEX è utile per costruire mappe di rischio climatico integrando dati climatici e indicatori socio-territoriali, anche se i dati grezzi siano complessi e richiedano competenze tecniche, esistono versioni semplificate o strumenti forniti da progetti europei e istituzioni nazionali che ne facilitano l'utilizzo in ambito urbanistico e architettonico.

2.3.3 Downscaling ibrido

Riassumendo, il **downscaling** dinamico impiega modelli climatici regionali che, a partire dalle condizioni

imposte dal GCM, simulano in modo esplicito l'evoluzione del clima all'interno di una regione specifica, considerando fattori come la topografia, la presenza di corpi idrici o l'uso del suolo; infatti, questo metodo risulta essere molto accurato, ma anche estremamente costoso in termini di risorse computazionali. Il **downscaling** statistico, invece, si basa su relazioni empiriche tra il clima su scala globale e quello locale, utilizzando dati storici osservati per generare serie temporali plausibili a livello locale e anche se risulta essere meno oneroso, l'approccio statistico soffre della limitazione di basarsi su assunzioni che il futuro evolverà a partire da schemi simili al passato, e spesso fatica a riprodurre gli eventi estremi.

Proprio ragionando a partire da queste limitazioni nasce e si sviluppa il concetto di **downscaling** ibrido, una metodologia che integra questi due processi cercando di unire in un solo processo la coerenza fisica del modello dinamico con la flessibilità ed il dettaglio del metodo statistico. Il processo si articola in due fasi: inizialmente si impiega un modello climatico regionale (RCM), che genera una prima serie di proiezioni climatiche con una buona risoluzione spaziale e temporale; successivamente, queste proiezioni vengono ulteriormente "affinate" attraverso tecniche statistiche che le adattano a condizioni locali più specifiche, sfruttando dati storici e algoritmi di

di interpolazione o trasformazione.

Dal punto di vista tecnico, il processo di creazione di un file climatico ibrido si articola in più fasi: prima tra tutte viene fatta l'elaborazione dinamica con un RCM, in seguito si applicano algoritmi statistici per modificare e deformare i dati in base a variazioni mensili di temperatura, radiazione e altri parametri, partendo da una serie storica osservata di un file TMY. I metodi più diffusi in questa fase sono il **Morphing** proposto da Belcher, che include trasformazioni additive (**shift**), moltiplicative (**stretch**) o una combinazione dei due. Infine, i dati vengono sintetizzati in formati compatibili con gli strumenti di simulazione, come gli EPW (**EnergyPlus Weather files**), che contengono valori orari per un anno intero.

Questo tipo di approccio consente di ottenere quindi dataset compatibili con i software di simulazione energetica come **EnergyPlus** o **TRNSYS**, fondamentali per valutare la resilienza degli edifici rispetto al cambiamento climatico, infatti, all'interno di questi software, le serie temporali climatiche ad alta risoluzione possono essere utilizzate per simulare il comportamento termico di un edificio in condizioni realistiche, valutando la domanda di raffrescamento e riscaldamento non solo in condizioni medie, ma anche durante ondate di calore o freddo estremo.

Proprio per questo motivo, il valore aggiunto del **downscaling** ibrido nasce dalla possibilità di poter considerare anche le condizioni estreme del clima: l'impiego esclusivo di file climatici "tipici" (ossia basati su valori medi storici o futuri) porta spesso a una significativa sottostima dei carichi di picco energetico, poiché gli edifici progettati sulla base di condizioni medie rischiano di non essere pronti a gestire situazioni di stress climatico, come ondate di calore sempre più frequenti e intense.

Il **downscaling** ibrido, invece, permette di includere scenari estremi nella valutazione, offrendo ai progettisti la possibilità di dimensionare correttamente impianti, isolamenti e strategie di raffrescamento passivo in modo più robusto e realistico.

Un ulteriore vantaggio del metodo ibrido è che può sintetizzare in pochi file meteorologici rappresentativi, ad esempio, tre: uno tipico, uno estremo caldo e uno estremo freddo, l'intera variabilità attesa di una serie trentennale, riuscendo così ad effettuare simulazioni accurate limitando il numero di scenari da considerare, riducendo i tempi di calcolo e rendendo più agevole il confronto tra alternative progettuali.

Il **downscaling** ibrido rappresenta quindi un metodo efficace per ottenere dati climatici ad alta risoluzione, utili nella progettazione edilizia e nella

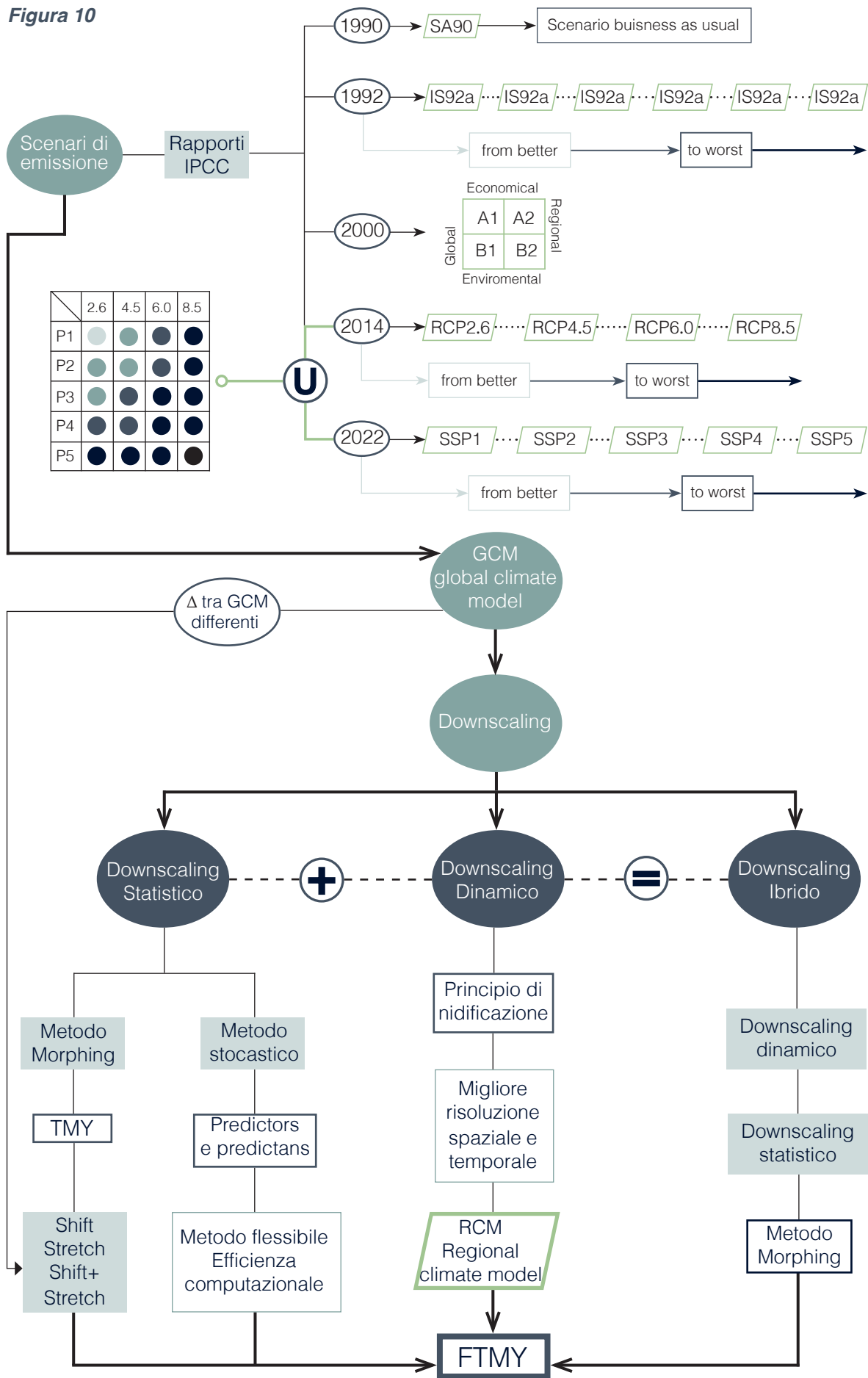
pianificazione urbana, diventando uno strumento particolarmente adatto nella valutazione della resilienza degli edifici e delle infrastrutture in scenari climatici futuri caratterizzati da maggiore variabilità climatica. In un contesto progettuale, affidarsi a dati tipici o semplificati può portare a sottovalutazioni significative, soprattutto per quanto riguarda i carichi di punta, mentre il **downscaling** ibrido offre una base solida per analisi più realistiche, contribuendo a ridurre l'incertezza e migliorare la qualità delle valutazioni energetiche e ambientali a scala locale.

Quanto descritto fino a questo momento sia per quanto riguarda la definizione di scenari di emissione futuri, sia per quanto riguarda le differenti tipologie di downscaling, viene riassunto e semplificato attraverso il diagramma di flusso in **Figura 10**.

Figura 10:

Diagramma di flusso riassuntivo, che presenta sia una timeline relativa alla normativa degli scenari di emissione, sia i diversi approcci per la generazione di dati di proiezione climatica con alta risoluzione spaziale e temporale.

Figura 10



All'interno di questo capitolo vengono descritte la metodologia adottata e le fasi operative seguite per lo sviluppo della ricerca, in modo che questa analisi possa essere trasparente e replicabile anche per altri casi studio che si trovano all'interno di contesti geografici diversificati e che possiedono distribuzione, destinazione d'uso, involucro ed impianti differenti da quelli utilizzati per questo elaborato di tesi.

Il flusso di lavoro, rappresentato graficamente nel diagramma riportato in **Figura 11** (che compare nella pagina successiva dell'elaborato), è stato concepito per garantire una progressione logica e coerente delle operazioni di analisi e simulazione.

Tale flusso parte dalla raccolta dei dati di input e dalla caratterizzazione dello stato di fatto, per poi proseguire con la modellazione energetica dell'edificio, la definizione degli scenari di riqualificazione e la verifica delle prestazioni energetiche in condizioni climatiche attuali e future.

L'intero processo culmina in una valutazione comparativa dei risultati ottenuti,

che ha come obiettivo principale quello di testare la resilienza a lungo termine (circa 100 anni) o meno dell'edificio preso in esame, a seguito di interventi di riqualificazione energetica; in particolare si intende valutare se e in che misura, anche in presenza di condizioni climatiche future mutate, i consumi energetici e le emissioni di anidride carbonica equivalente risultino uguali o inferiori rispetto ai consumi attuali del fabbricato.

In questo modo, non solo si verifica l'efficacia dell'intervento in condizioni standard, ma anche la capacità dell'edificio di mantenere prestazioni energetiche adeguate in scenari futuri più severi (es. ondate di calore, inverni più rigidi, instabilità climatica), confermando quindi che la riqualificazione per essere del tutto efficace deve essere attenta all'obiettivo resilienza per fare in modo di non ridurre solo i consumi e le emissioni attuali, ma assicurando il funzionamento delle strategie adottate anche in futuro e sotto stress climatico.

Pertanto, la metodologia proposta si configura come

un processo dinamico e integrato, nel quale l'approccio prestazionale si combina con una prospettiva di lungo periodo orientata alla sostenibilità e alla resilienza energetica.

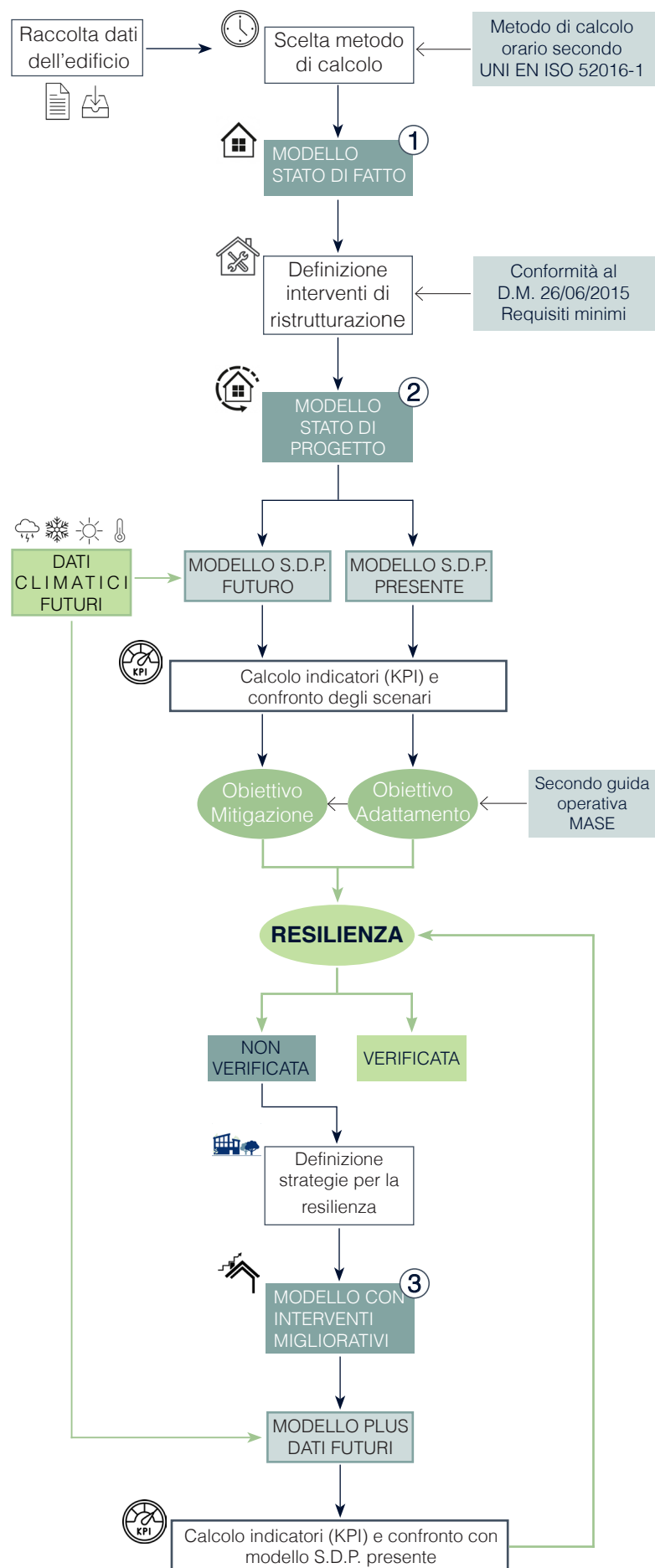


Figura 11:
Diagramma di flusso riassuntivo dell'intera metodologia di lavoro utilizzato per l'elaborato di tesi.

3.1

Raccolta dati e modello allo stato di fatto

Il primo step per dare avvio allo studio è quello di raccogliere e selezionare tutti i dati necessari per la modellazione energetica dell'edificio preso in considerazione: in particolare la ricerca parte dall'assunzione delle informazioni di carattere più generale come la categoria del fabbricato secondo il DPR 412/93 [55], la selezione della località dell'edificio ed i relativi dati climatici e la scelta del regime normativo da applicare al lavoro. In questa metodologia di lavoro viene adottato il regime normativo basato sul calcolo dinamico orario semplificato, definito dalla norma UNI EN ISO 52016-1:2018 [56]: tale approccio consente di ottenere un livello di dettaglio più elevato nel modello, necessario per perseguire in modo più efficace l'obiettivo dell'elaborato, ovvero valutare la resilienza del fabbricato, prestando particolare attenzione al controllo del fabbisogno per il raffrescamento. L'utilizzo di questa metodologia rende più accurata la modellazione degli interventi di riqualificazione, permettendo ad esempio di creare profili orari per l'occupazione dei locali climatizzati, o per l'utilizzo degli impianti e delle schermature.

Proseguendo si passa alla definizione dei componenti

dell'involucro tra cui muri, pavimenti, soffitti, ponti termici e componenti finestrati, sia dal punto di vista geometrico, sia definendone le caratteristiche termiche; in seguito vengono definiti gli ombreggiamenti, i locali climatizzati e non per poi passare alla ricerca di tutte le informazioni relative agli impianti per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, creazione di acqua calda sanitaria ed impianti per la produzione di energia rinnovabile.

A seconda della disponibilità delle informazioni e della tipologia di analisi da effettuare, i dati di input possono provenire da diverse fonti: essi possono essere ottenuti da misurazioni reali effettuate sull'edificio in esame, assunti come valori standard indicati nelle normative tecniche di riferimento, oppure stimati sulla base di dati comparativi ricavati da edifici con caratteristiche analoghe in termini di destinazione d'uso, dimensioni e tipologia costruttiva.

3.2

Stato di Progetto

La fase di ristrutturazione energetica rappresenta un punto fondamentale per il processo metodologico, in quanto consente di tradurre in interventi concreti le strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti

[55] Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412: *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 242, 14 ottobre 1993.

[56] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1:2018, *prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, delle temperature interne e dei carichi di riscaldamento e raffrescamento - Parte 1: Modelli di calcolo dettagliati e semplificati*, Milano, 2018

climatici. L'obiettivo è duplice: da un lato, ridurre i consumi energetici e le emissioni di gas a effetto serra: obiettivo mitigazione; dall'altro, aumentare la capacità dell'edificio di mantenere prestazioni energetiche e livelli di **comfort** adeguati anche in condizioni climatiche future più estreme: obiettivo adattamento.

Il primo passo per definire gli interventi di ristrutturazione da adottare consiste nella verifica del rispetto dei requisiti minimi di prestazione energetica, stabiliti dalla normativa vigente D.M. 26.06.2015 [57], infatti il soddisfacimento di tali requisiti rappresenta la condizione di base necessaria per avviare il percorso verso la resilienza energetica. Solo a partire da un edificio che rispetta le prescrizioni minime è possibile introdurre strategie più avanzate, volte al miglioramento della qualità dell'involucro, alla riduzione della domanda di energia primaria, al controllo della radiazione solare e all'ottimizzazione del comportamento termico dinamico dell'edificio.

In riferimento all'obiettivo di mitigazione, la Guida Operativa del MEF per il rispetto del principio DNSH [58] stabilisce specifici criteri che determinano l'ammissibilità di un intervento di ristrutturazione o riqualificazione ai fini del finanziamento. In particolare:

- Nel caso di una ristrutturazione importante (di primo o secondo livello), l'intervento deve risultare conforme ai

requisiti previsti dai regolamenti edilizi vigenti e definiti nel Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015, relativo all'applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e alla definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, in attuazione della Direttiva sul rendimento energetico degli edifici (EPBD).

- In alternativa, l'intervento può essere considerato ammissibile se garantisce una riduzione del fabbisogno di energia primaria globale (EP_{gl,tot}) di almeno il 30% rispetto ai valori registrati prima della realizzazione dei lavori.

Per quanto riguarda invece l'obiettivo adattamento la guida operativa del MEF [58] risulta essere meno specifica in termini di parametri da rispettare e normativa di riferimento, ma vengono fornite delle linee guida da seguire, infatti viene solamente indicato che, per individuare i rischi climatici fisici pertinenti a un determinato investimento, è necessario condurre una valutazione accurata del rischio climatico e della vulnerabilità e che questa analisi deve essere proporzionata alla scala e alla durata dell'attività considerata, prevedendo un livello di approfondimento maggiore per quelle con una vita utile stimata superiore ai dieci anni. In particolare, la Guida [58] specifica che:

a) Per le attività con una durata prevista inferiore a 10 anni, la valutazione deve

[57] Ministero dello Sviluppo Economico, Decreto Ministeriale 26 giugno 2015: *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 162, 15/07/2015.

[58] Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF), *Guida operativa per il rispetto del principio di non arrecare danno significativo all'ambiente* (cd. DNSH, RGS / MASE, Allegata alla Circolare RGS n. 22 del 14 maggio 2024, Roma.

essere condotta utilizzando proiezioni climatiche elaborate sulla scala temporale e spaziale più ridotta possibile, in modo da garantire una maggiore precisione dei risultati.

b) Per tutte le altre tipologie di attività, la valutazione deve basarsi su proiezioni climatiche avanzate, con il massimo livello di dettaglio disponibile tra gli scenari futuri esistenti. Tali proiezioni devono essere coerenti con la durata dell'intervento e includere, per i grandi investimenti, almeno scenari climatici con orizzonte temporale compreso tra 10 e 30 anni

Il documento specifica, inoltre, che le proiezioni climatiche e la successiva valutazione degli impatti devono essere prodotte facendo riferimento alle migliori pratiche internazionali e alle più aggiornate evidenze scientifiche disponibili. L'analisi della vulnerabilità e del rischio climatico si basa su metodologie riconosciute a livello globale, coerenti con gli approcci illustrati nei più recenti rapporti dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e nelle pubblicazioni scientifiche; inoltre per la definizione degli scenari futuri, vengono considerati i percorsi di concentrazione rappresentativi (RCP – *Representative Concentration Pathways*) proposti dall'IPCC, tra cui RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, che descrivono differenti evoluzioni delle emissioni e del riscaldamento globale nel corso del secolo.

3.2.1 Indicatori di prestazione e metodi di calcolo

Nell'ambito dell'elaborato di tesi, relativamente all'obiettivo di mitigazione, si assumono come già valutati sia il rispetto dei requisiti minimi di prestazione energetica definiti dal D.M. Requisiti Minimi del 2015, sia la riduzione di almeno il 30% dell'EP_{gl}, tot [kWh/m²], secondo quanto esPLICITATO nelle indicazioni della Guida del MEF [59], assumendo tali parametri come base di riferimento per redigere un modello dello stato di progetto e considerando quest'ultimo come base di partenza per eventuali ulteriori interventi di miglioramento energetico.

La scelta dei parametri per l'obiettivo adattamento ricade su una serie di parametri:

- EP_{H,nd}[kWh/m² anno], che rappresenta l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento.
- EP_{C,nd}[kWh/m² anno], che rappresenta l'indice di prestazione termica utile per il raffrescamento.

Ovvero i fabbisogni di energia per il riscaldamento e raffrescamento normalizzati rispetto alla superficie netta del fabbricato.

Ma anche parametri di tipo energetico come:

- Pot. Max. H [W], ovvero la potenza di picco per il riscaldamento.
- Pot. Max. C [W], ovvero la

[59] Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF), *Guida operativa per il rispetto del principio di non arrecare danno significativo all'ambiente* (cd. *DNSH*, RGS / MASE), Allegata alla Circolare RGS n. 22 del 14 maggio 2024, Roma.

[60] *L'Indoor Environmental Quality* (IEQ), rappresenta l'insieme delle condizioni ambientali presenti all'interno di un edificio che influenzano il benessere, la salute e la produttività degli occupanti. Essa comprende la qualità dell'aria interna, il comfort termico, il comfort visivo e il comfort acustico, oltre ad aspetti legati alla ventilazione, all'illuminazione naturale e artificiale e ai materiali impiegati.

[61] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1:2018, *prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, delle temperature interne e dei carichi di riscaldamento e raffrescamento - Parte 1: Modelli di calcolo dettagliati e semplificati*, Milano, 2018

[62] Ente Nazionale Italiano, UNI 11300-1:2014 - *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva*, Milano, 2019.

[63] Ente Nazionale Italiano, UNI 10349-1:2016 - *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione energetica degli edifici e metodi per ripartire le grandezze climatiche in base alle condizioni mensili e orarie*, Milano, 2016.

potenza di picco per il raffrescamento.

- EP_{nren} [kWh/m² anno], che rappresenta l'energia primaria derivante da fonti non rinnovabili.

- EP_{ren} [kWh/m² anno], che rappresenta l'energia primaria derivante da fonti rinnovabili.

- $EP_{H,tot}$ [kWh/m² anno], che rappresenta l'energia primaria totale per il riscaldamento.

- $EP_{C,tot}$ [kWh/m² anno], che rappresenta l'energia primaria totale per il raffrescamento.

- $EP_{gl,tot}$ [kWh/m²], che rappresenta l'energia primaria globale.

- Q_{del} [kWh], ovvero l'energia ingresso al generatore di calore, suddivisa nelle componenti provenienti da metano, energia elettrica.

In aggiunta parametri di tipo ambientale come:

- Emissioni di CO₂ dovute dall'utilizzo dell'energia elettrica [kg/anno].

- Emissioni di CO₂ dovute dall'utilizzo di metano [kg/anno].

- Emissioni di CO₂ totali [kg/anno].

Infine, parametri legati al benessere termico (IEQ [60]):

- Numero di ore pesate di *discomfort* [h].

In particolare, alcuni dei parametri relativi all'involucro edilizio, quali gli indici di prestazione termica utile e le potenze di picco sono stati determinati assumendo un impianto a potenza illimitata, in conformità a

quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 52016-1:2018 [61]: tale approccio si basa sull'ipotesi di un sistema ideale, capace di fornire in ogni istante all'ambiente interno l'energia necessaria a mantenere la temperatura di *set-point*, indipendente da eventuali vincoli di capacità o rendimento. Al contrario, i parametri legati al comportamento energetico complessivo come l'energia primaria non rinnovabile e totale, l'energia primaria necessaria per il riscaldamento e raffrescamento, l'energia di ingresso al generatore e le emissioni di CO₂ sono stati calcolati considerando la potenza effettivamente disponibile dell'impianto reale, così da rappresentare in modo più aderente le prestazioni operative del sistema edificio - impianto. Un metodo ancora differente viene utilizzato invece per il calcolo delle ore pesate di *discomfort*, ovvero viene fatta una simulazione ad impianto spento, considerando quindi le temperature operative dell'aria interna che vengono calcolate senza l'utilizzo di impianti.

Per quanto riguarda l'obiettivo mitigazione, solitamente i calcoli dei parametri energetici vengono condotti utilizzando un approccio basato su condizioni quasi stazionarie, con analisi su base mensile, seguendo quanto indicato nella serie di norme tecniche UNI/TS 11300: 2019 [62] e facendo riferimento ai dati climatici standard previsti dalla norma UNI 10349-1: 2016 [63],

ma questo non rappresenta l'oggetto di argomento di questa tesi, se non per la riduzione di emissioni di CO₂. Al fine di verificare invece l'obiettivo di adattamento ai cambiamenti climatici, è stato adottato come detto in precedenza un metodo di calcolo dinamico semplificato, con risoluzione temporale oraria, secondo la norma UNI EN ISO 52016-1:2018.

3.2.2 Generazione dei dati climatici futuri

Il punto di partenza per la generazione dei dati climatici futuri utilizzati all'interno dell'elaborato di tesi è rappresentato dai dati climatici regionali forniti dal database CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), un'iniziativa internazionale dedicata al *downscaling* climaticoregionale [64], cioè al raffinamento delle proiezioni dei modelli climatici globali (GCM) per ottenere previsioni più dettagliate e rappresentative a livello locale; CORDEX grazie a modelli climatici regionali (RCM), mette a disposizione dati ad alta risoluzione spaziale e temporale fino ad arrivare ad esempio, a dati ricavati su una griglia di circa 12 km² e con scansione temporale oraria, su variabili chiave come temperatura, umidità, vento e radiazione solare.

I dati CORDEX secondo quanto esplicitato all'interno

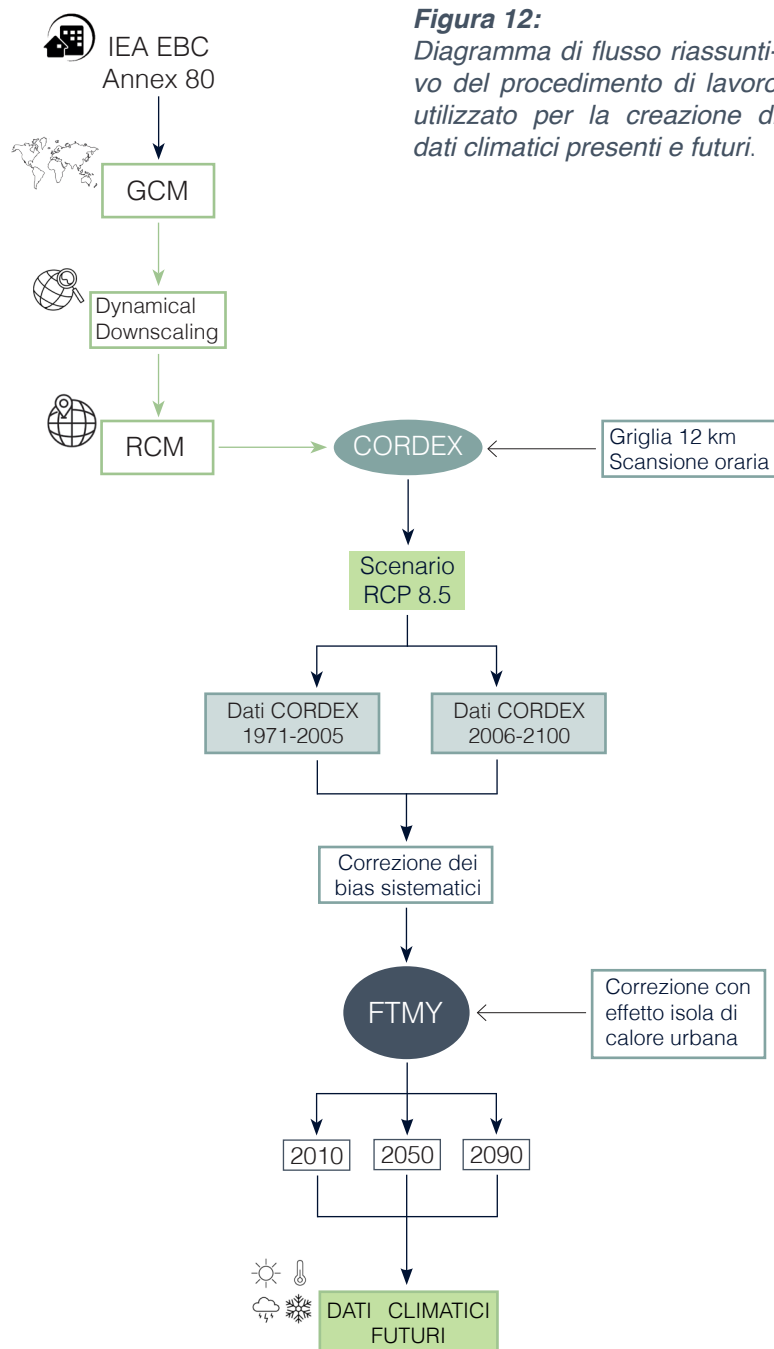


Figura 12:

Diagramma di flusso riassuntivo del procedimento di lavoro utilizzato per la creazione di dati climatici presenti e futuri.

dell'articolo “*Generation of Future UHI Weather Data (Deliverable 2.2)*” [65] coprono sia un periodo storico (1971-2005) sia uno futuro (2006-2100), simulato secondo diversi scenari emissivi: anche se in questo lavoro è stato adottato lo scenario RCP 8.5, lo scenario cosiddetto “pessimistico”, caratterizzato da elevate emissioni e quindi da un'evoluzione climatica

[64] <https://cordex.org/>

[65] Progetto CRiStAll, *Generazione di dati meteorologici futuri con effetto isola di calore urbana (Deliverable 2.2)*, Rapporto tecnico nell'ambito di Climate Resilient Strategies by Archetype-based Urban Energy Modelling, finanziato da UE: Next Generation EU (PRIN 2022 PNRR, D.D.1409/2022),2024.

particolarmente critica.

Un primo problema da affrontare riguarda i *bias* sistematici dei modelli, ossia scostamenti tra i valori osservati e quelli realmente osservati, che, se non corretti, renderebbe i *dataset* poco realistici e poco adatti all'uso nelle simulazioni energetiche. Per questo motivo è stato necessario introdurre una fase di correzione dei bias, svolto attraverso due metodologie principali:

- *Quantile Delta Mapping* (QDM) [66], procedimento di tipo uni variato, che interviene su singole variabili, come la temperatura, l'umidità o la radiazione.
- *Multivariate Bias Correction* (MBCn), che invece, corregge contemporaneamente più variabili mantenendo le relazioni fisiche tra di esse, ad esempio quelle che legano temperatura, umidità e vento.

Il processo di correzione viene applicato a tre diversi periodi:

- Periodo storico, usato per calibrare la procedura grazie alla disponibilità di dati osservati e simulati.
- Periodo di controllo, utilizzato per validare l'efficacia della correzione.
- Periodo futuro, per il quale le proiezioni modellistiche sono corrette sulla base della calibrazione precedente.

Una volta corretti, i dati climatici sono stati trasformati in file TMY, costruiti secondo lo standard UNI-EN-ISO 15927-4, in particolare vengono prodotti TMY relativi a tre orizzonti temporali

differenti: quello presente, un periodo di medio termine compreso tra il 2041 e il 2060, e un periodo di lungo termine che copre gli anni dal 2081 al 2100. Successivamente, per includere l'impatto delle condizioni urbane, i dati corretti sono stati integrati con l'effetto dell'isola di calore urbana (UHI) mediante il modello UWG (*Urban Weather Generator*), sviluppato dal *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Questo modello, combinato con correlazioni statistiche tra morfologia urbana e intensità dell'UHI, consente di differenziare le condizioni climatiche tra aree urbane e rurali e di simulare in modo realistico l'amplificazione delle temperature dovuta alla densità edilizia e alle superfici impermeabili.

Nella presente tesi viene assunta Torino come città di riferimento, utilizzando come modello di riferimento quello di GERICS_MPI-M-MPI-ESM-LR, con una risoluzione spaziale di 0.11° (circa 12,5 km) e la stazione meteorologica di riferimento è quella di Bauducchi (44.96° N, 7.70° E, 226 m s.l.m.). Le variabili considerate includono:

- temperatura e umidità dell'aria,
- velocità e direzione del vento,
- pressione superficiale,
- radiazione solare diretta.

Per la calibrazione sono stati impiegati dati osservati relativi al periodo 1994-2003, mentre il periodo 2014-2023 è stato utilizzato per la

[66] Il QDM confronta la distribuzione statistica di una variabile simulata da un modello climatico con quella osservata localmente nel periodo storico, che utilizza il delta tra i quantili delle due distribuzioni per "rimappare" le proiezioni future del modello, preservando il segnale del cambiamento climatico ma rendendo i dati più aderenti alla realtà osservata.

verifica della correzione. L'applicazione del metodo MBCn ha ridotto significativamente gli errori medi quadrati (RMS) tra modello e osservazioni: ad esempio, per la temperatura da 0,748 °C a 0,624 °C, per l'umidità relativa da 12,68% a 6,34%, per la radiazione globale da 26,7 a 20,9 W/m² e per la velocità del vento da 0,519 a 0,089 m/s.

Le proiezioni risultanti evidenziano una progressiva evoluzione del bilancio energetico degli edifici: i gradi giorno di riscaldamento (HDD [67]) si riducono da 2143 a 1918 fino a 1518, mentre i gradi giorno di raffrescamento (CDD [68]) aumentano da 550 a 720 fino a 1120, indicando una crescita.

significativa della domanda di climatizzazione estiva. L'effetto UHI, analizzato su 170 isolati urbani, riduce ulteriormente la domanda di riscaldamento ma amplifica quella di raffrescamento, accentuando il rischio di disagio termico estivo. La metodologia descritta si inserisce nel quadro del progetto internazionale *Annex 80* [69] promosso nell'ambito delle attività della *International Energy Agency - Energy in Buildings and Communities* (IEA EBC), avviato nel luglio 2019, si occupa dello studio e della diffusione di strategie di raffrescamento resiliente per gli edifici, con l'obiettivo di promuovere soluzioni a basso consumo energetico e di ridurre le emissioni climalteranti, migliorando la capacità degli

di adattarsi ai cambiamenti climatici futuri.

3.3 Strategie di intervento resilienti ai cambiamenti climatici

Sulla base del flusso metodologico illustrato nel diagramma (*Figura 12*), l'ultima fase del processo di lavoro, che consiste nella definizione delle strategie di intervento e nella verifica della resilienza energetica dell'edificio rispetto agli anni climatici tipo utilizzati, rappresenta il punto di convergenza tra la modellazione energetica, gli obiettivi di mitigazione e adattamento e la valutazione prestazionale nel lungo periodo.

A questo punto dell'analisi il modello allo stato di progetto viene utilizzato come un nuovo modello dello stato di fatto, diventando il nuovo punto di partenza per individuare diversi scenari di riqualificazione che integrino strategie di mitigazione ed adattamento per migliorare sempre di più le prestazioni termiche dell'edificio e quindi aumentare la resilienza energetica di quest'ultimo. Le strategie proposte all'interno del documento fondativo di *Annex 80: "Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials"* [70] si suddividono in:

1. Riduzione dei carichi termici:
Comprende interventi sull'

[67] *Heating Degree Days, base 18 °C*: indicatore del fabbisogno di riscaldamento, calcolato come la somma delle differenze tra la temperatura base di 18 °C e la temperatura media giornaliera quando quest'ultima risulta inferiore a 18 °C

[68] *Cooling Degree Days, base 18 °C*: indicatore del fabbisogno di raffrescamento, calcolato come la somma delle differenze tra la temperatura media giornaliera e la temperatura base di 18 °C quando la temperatura media risulta superiore a 18 °C.

[69] <https://annex80.iea-ebc.org/programme>

[70] IEA EBC Annex 80, *Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials*, IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Vienna University of Technology, 2020.



Figura 13:

I componenti di una definizione di resilienza di un campo o dominio specifico. Tratto da: Attia S., Levinson R., Ndongo E., Holzer P., Berk Kazanci O., Homaei S., Zhang C., Olesen B. W., QiD. Hamdy, M. & Heiselberg P., Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition, Energy and Buildings, 239, Article 110869, 2021.

involucro e sull'ambiente esterno, come il miglioramento dell'isolamento e la limitazione dei ponti termici, l'impiego di schermature solari mobili o integrate, la scelta di vetri selettivi e materiali riflettenti, la riduzione dei guadagni interni e una progettazione che favorisca ombreggiamento naturale e corretta orientazione dell'edificio.

2. Raffrescamento passivo: Include strategie che sfruttano fenomeni naturali per smaltire il calore: ventilazione naturale o notturna automatizzata, uso della massa termica per attenuare i picchi di temperatura, raffrescamento evaporativo, tetti e facciate verdi, e superfici con elevata emissività per il raffreddamento radiativo verso il cielo notturno.

3. Raffrescamento attivo ad alta efficienza: prevede l'utilizzo di pompe di calore reversibili ad alte prestazioni, sistemi radianti o a bassa temperatura di mandata, ventilazione meccanica con recupero termico, soluzioni di free cooling e integrazione con fonti rinnovabili come impianti fotovoltaici o solari termici.

4. Gestione e controllo adattivo: si basa su sistemi di automazione e monitoraggio intelligenti, capaci di regolare in modo dinamico schermature, aperture e ventilazione in funzione delle condizioni climatiche. L'approccio include anche strategie di demand response e il coinvolgimento attivo degli utenti

nella gestione del **comfort** e dei consumi.

5. Strategie a scala urbana Estendono il concetto di resilienza all'ambiente urbano, attraverso l'uso di infrastrutture verdi e blu, superfici riflettenti e permeabili, pianificazione microclimatica per favorire ventilazione naturale e la realizzazione di reti energetiche locali in grado di garantire continuità di servizio durante eventi critici.

Ogni strategia adottata (in questo caso ne vengono selezionate tre, ovvero la ventilazione naturale controllata, schermature solari e superfici ad alta riflettanza solare) viene quindi tradotta in un modello energetico di progetto, costruito mantenendo coerenti le condizioni di uso, occupazione e orari di funzionamento, in modo da consentire un confronto diretto con il modello dello stato di fatto.

La verifica della resilienza viene condotta attraverso un approccio comparativo basato su simulazioni dinamiche orarie, utilizzando come **input** i dati climatici corretti e proiettati ai tre orizzonti temporali, ovvero scenario tempo presente TMY 2010, scenario medio termine FTM 2050, scenario a lungo termine FTM 2090. Il confronto tra i risultati ottenuti nei tre scenari climatici consente di capire se ognuna delle strategie prese in considerazione risulta essere efficace o meno nel contesto geografico e climatico in cui è inserito l'edificio, e consente anche di

identificare le strategie più efficaci e resilienti, ossia quelle che mantengono prestazioni energetiche e livelli di **comfort** stabili o migliorativi anche in presenza di un peggioramento delle condizioni ambientali esterne.

Il concetto di resilienza, nella sua accezione più ampia, si configura come un principio olistico che coinvolge aspetti economici, sociali e ambientali, e che fa riferimento alla capacità di un sistema di adattarsi, resistere e recuperare di fronte a eventi disturbanti o a mutamenti delle condizioni di contesto: all'interno di questa tesi, tale concetto viene declinato nella sua dimensione energetica, ponendo l'attenzione sulla capacità degli edifici riqualificati di mantenere prestazioni energetiche e livelli di **comfort** accettabili anche al variare delle condizioni climatiche mutate nel lungo periodo.

La verifica della resilienza si fonda sulla domanda preliminare: "resiliente a cosa?", che consente di definire in modo chiaro i limiti e gli obiettivi dell'analisi, come viene sottolineato nel manuale tecnico "**Resilient Cooling Design Guidelines**" [71], inoltre esplicita che la resilienza deve essere interpretata secondo tre dimensioni fondamentali: scala, tempo e perturbazione (**scale, time and disruption**).

Queste coordinate costituiscono la base per valutare la risposta di un sistema edilizio alle diverse forme di stress, che possono

riguardare variazioni climatiche di lungo periodo o eventi estremi di breve durata. Nel caso specifico di questa ricerca, l'analisi si colloca alla scala dell'edificio, con un orizzonte temporale di circa un secolo, in modo da considerare l'evoluzione delle condizioni climatiche e l'innalzamento progressivo delle temperature come fattori di fondo, più che come eventi eccezionali. L'obiettivo è quindi indagare il comportamento energetico dell'edificio nel tempo, osservando come le strategie di riqualificazione influenzino la sua capacità di mantenere efficienza e comfort in uno scenario climatico in mutamento.

In quest'ottica, l'edificio può essere considerato resiliente se, al variare delle condizioni climatiche future, i consumi energetici e le emissioni di CO₂ equivalente restano uguali o inferiori rispetto allo scenario attuale, e se le condizioni di **comfort** interno si mantengono entro limiti accettabili senza incrementi significativi del fabbisogno di raffreddamento. Tale valutazione, che assume un carattere evolutivo e prestazionale, consente di verificare non solo l'efficacia delle strategie di riqualificazione nel presente, ma anche la loro capacità di adattamento nel tempo, garantendo così la durabilità degli interventi e la coerenza con gli obiettivi di sostenibilità e neutralità climatica.

[71] Attia S., Levinson R., Rahif R., Zhang S., Miller W., et al., *Resilient Cooling Design Guidelines (Parts 1 & 2)*, International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities (EBC) Programme, Annex 80: *Resilient Cooling of Buildings*. REHVA & IEA-EBC, 2023.



L'edificio oggetto di studio è la sede principale degli uffici di Edilclima S.r.l., situata in Piemonte, nel comune di Borgomanero (NO), in via Antonio Vivaldi 7. Edilclima S.r.l. è un'azienda italiana specializzata nello sviluppo di **software** tecnici per l'edilizia e l'impiantistica, con particolare attenzione ai temi della progettazione energetica, termotecnica e ambientale. La società fornisce strumenti e consulenza per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, la progettazione di impianti termici e anticendio, la gestione dell'efficienza energetica e l'analisi del **comfort** ambientale, rivolgendosi a professionisti, studi tecnici e pubbliche amministrazioni.

Il fabbricato utilizzato all'interno dell'elaborato di tesi per tutte le simulazioni energetiche presenta una pianta ad "L" che si sviluppa su due piani fuori terra ed un piano mansardato. Dal punto di vista climatico, l'edificio ricade in zona climatica E, con un numero di gradi-giorno pari a 2.709; tale classificazione indica la presenza di inverni piuttosto rigidi, che rendono necessario un buon livello di isolamento termico e un'attenta

progettazione dell'involucro edilizio. Tuttavia, si evidenzia come, anche in questo contesto, stiano assumendo un'importanza crescente le strategie di controllo e riduzione della richiesta di energia primaria per il raffrescamento, in risposta ai sempre più frequenti episodi di surriscaldamento estivo dovuti al cambiamento climatico. Attualmente, una delle due unità immobiliari in cui l'edificio è suddiviso ospita già parte degli uffici della società, mentre l'altra metà, ad oggi presenta destinazione d'uso residenziale, ma sarà oggetto di intervento di ampliamento e ristrutturazione per essere destinata anch'essa ad uso uffici.

4.1 Modello dello stato di fatto

Per la modellazione dello stato di fatto dell'edificio, ma anche per tutti i modelli energetici di cui si parlerà in seguito, è stato utilizzato il **software** EC700 di Edilclima e sono state determinate alcune assunzioni e semplificazioni che vengono elencate di seguito.



Figura 14:
Ingresso principale della sede di Edilclima a Borgomanero.

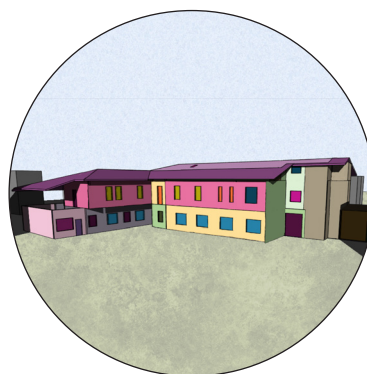


Figura 15:
Immagine volumetrica estratta dall'input grafico di EC700

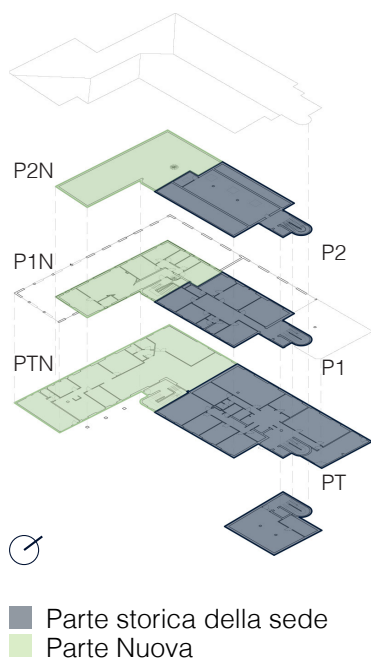


Figura 16:
Esploso delle piante dei vari piani dell'edificio in assonometria, che esplicita la suddivisione in parte storica e parte nuova della sede.

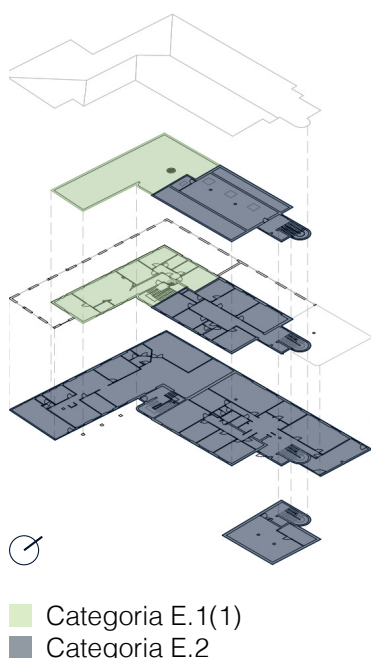


Figura 17:
Esploso delle piante dei vari piani dell'edificio in assonometria, che esplicita la categoria di destinazione d'uso secondo il DPR 412/93.

Denominazioni

PT = Piano terra della parte storica della sede (parte ad Est).

PTN = Piano terra della parte acquisita da Edilclima su cui insisterà il nuovo progetto per l'ampliamento (parte ad Ovest).

P1 = Piano primo della parte storica della sede.

P1N = Piano primo della parte acquisita da Edilclima su cui insisterà il nuovo progetto per l'ampliamento (per questa sezione del progetto oltre ad un cambio di distribuzione è previsto un cambio di destinazione d'uso: da residenziale ad uffici).

P2 = Piano mansarda degli uffici.

P2 = Piano mansarda del residenziale

Distribuzione e categoria d'uso

Per lo stato di fatto viene utilizzata la divisione degli ambienti interni attuale che vede locali adibiti ad uffici e assimilabili (categoria E.2) per quasi la totalità dell'immobile, tranne nella parte ad Ovest a piano primo in cui è presente un appartamento a carattere residenziale di 170 m² abitato da pensionati (categoria E.1(1)).

Zone termiche

Numero	Descrizione	Superficie netta [m ²]	Volume lordo [m ³]	Superficie lorda	S/V [m ⁻¹]
1	P1N Bagni e assimilabili	46.28	198.78	99.37	0.5
2	PT-1-2 Locali servizio- Interno	315.17	1332.12	671.01	0.5
3	PTN Uffici Est- Ovest	44.74	211.19	136.33	0.65
4	PTN Locali servizio Est- Ovest	285.58	1261.31	733.1	0.58
5	PT-1 – Uffici Nord	176.81	782.62	379	0.48
6	PT-1 – Uffici Sud	140.5	620.05	304.03	0.49
7	P1N Soggiorno – camera da letto	101.18	405.04	96.92	0.24

Per la suddivisione dell'edificio in zone termiche viene presa in considerazione sia l'esposizione del locale considerato sia la sua funzione: vengono così individuate 7 zone termiche, 3 per la parte esistente e 4 per l'ampliamento, come riportato in **Figura 18**.

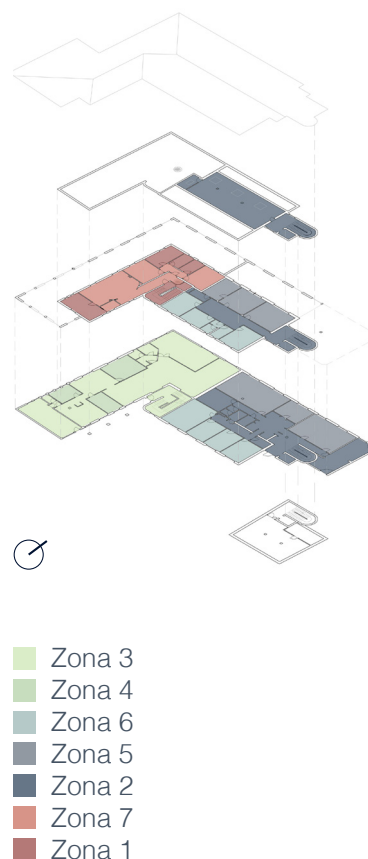


Figura 18:
Esploso delle piante dei vari piani dell'edificio in assonometria, che esplicita la suddivisione in zone termiche.

4.1.1 Involucro

Componenti opachi

I componenti opachi dell’edificio analizzato presentano una marcata eterogeneità per tipologia costruttiva e spessore: di seguito si riportano le stratigrafie più rappresentative al fine di descrivere in modo sintetico l’insieme degli elementi edilizi. Per quanto riguarda le chiusure verticali verso l’esterno, è presente una muratura in laterizio a cassa vuota con intercapedine non isolata, integrata internamente da un sistema di isolamento in fibra di vetro dello spessore di 5 cm (*Figura 19*). I solai interpiano sono realizzati in laterocemento, con spessore complessivo di circa 35 cm (*Figura 20*). La copertura è costituita da un solaio in laterocemento sul quale poggia una struttura lignea di supporto al manto in tegole di argilla, per uno spessore totale di circa 40 cm (*Figura 21*). Infine le strutture del piano interrato sono eseguite in calcestruzzo armato, con pareti aventi spessore medio di 40 cm (*Figura 22*) .

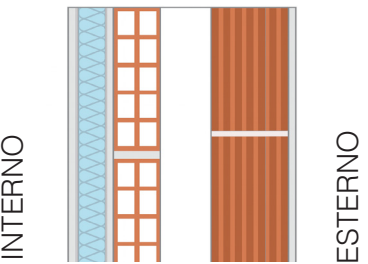


Figura 19:
Muratura tipo verso esterno, spessore 37 cm, trasmittanza 0,457 W/m²K.

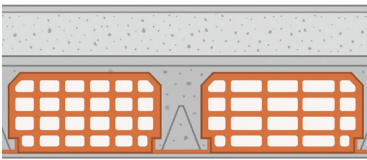


Figura 20:
Solaio interpiano in latero cemento, spessore 35 cm, trasmittanza 1,329 W/m²K.

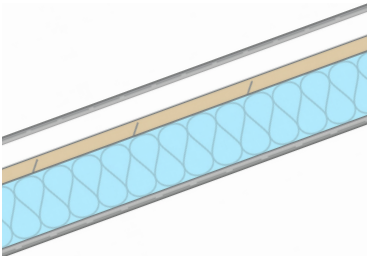


Figura 21:
Copertura inclinata (parte superiore), spessore 20 cm, trasmittanza 0.439 W/m²K.

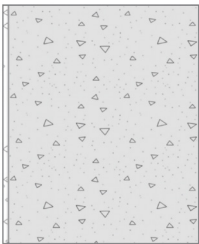


Figura 22:
Muratura interrata in calcestruzzo armato inclinata (parte superiore), spessore 40 cm, trasmittanza 0.823W/m²K.

Ponti termici:

GF = Ponti termici per pavimenti controterra.
Anche in questo caso viene fatto lo stesso ragionamento: viene suddiviso il

piano terra in zona storica della sede e zona nuova e per ognuna viene creato un ponte termico scegliendo un muro ed un solaio tipo riportati in tabella:

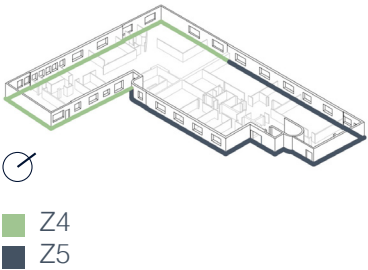


Figura 23:
Pianta piano terra con indicazione dei ponti termici per pavimenti contro terra.

W = Ponti termici relativi ai serramenti

Piano	Muro di riferimento	Ponte termico	Tipo	U telaio
PT	M1	Z1	W9	2
PTN	M5	Z2	W9	2
P1	M8	Z3	W9	2
P1N	M8	Z3	W9	2
P2	M1	Z1	W9	2

I ponti termici che riguardano i serramenti si suddividono in 3 macrocategorie: una tipologia riguarda la sede storica del piano terra dove come muro viene preso in considerazione M1, poiché risulta essere la muratura più ricorrente nella zona; con lo stesso ragionamento vengono selezionati i muri M5 ed M8 rispettivamente per la zona nuova del piano terra e per il piano primo.

Ponte termico	Tipo	Piano	Muro di riferimento	Pavimento di riferimento	Area [m²]	Perimetro [m]
Z4	GF3	PT	M1	P4	350	84
Z5	GF3	PTN	M5	P1	320	68

Per quanto riguarda i ponti termici dei serramenti dell'ultimo piano mansarda to viene utilizzato lo stesso muro di riferimento (M1) del piano terra della parte storica della sede.

IF = Ponti termici parete – solaio interpiano.

Ponte termico	Tipo	Parete di riferimento	Solaio di riferimento
Z6	IF3	M1	P6

Questa tipologia di ponte termico risulta essere presente solamente nella parte storica della sede e viene semplificato scegliendo una parete tipo (M1: quella usata in precedenza) ed un solaio tipo (P6).

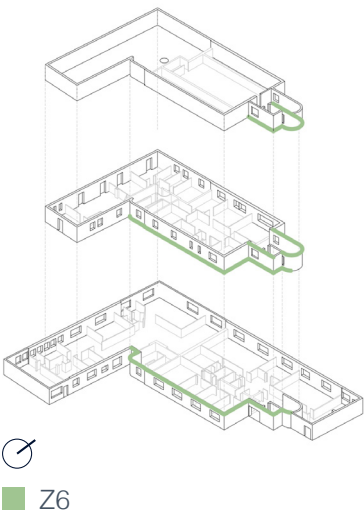


Figura 24:
Piante piano terra, primo, mansarda con indicazione dei ponti termici tra parete e solaio interpiano.

R = Parete – copertura

Ponte termico	Piano	Tipologia	Parete di riferimento	Soffitto
Z7	PT	R15	M1	S8
Z8	PTN	R15	M5	S8
Z11	P1N	R7e	M8	S2

Il fabbricato presenta un'estesa presenza di questa specifica tipologia di ponte termico, dovuta principalmente alle sue geometrie complesse e articolate. La conformazione volumetrica dell'edificio, infatti, è caratterizzata da corpi sfalsati e disallineati che generano un'elevata superficie di terrazzi e aggetti. Tali elementi, pur contribuendo al valore estetico e funzionale della costruzione, comportano un incremento significativo delle discontinuità termiche in involucro.

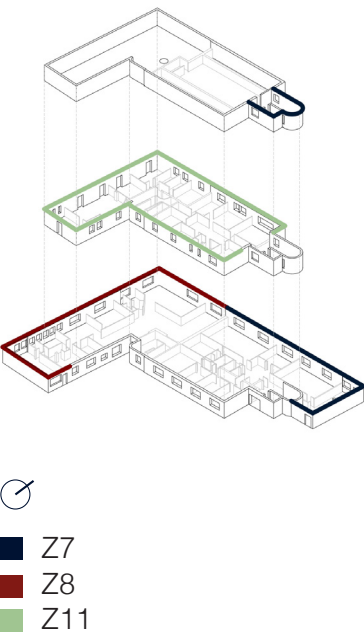


Figura 25:
Piante piano terra, primo, mansarda con indicazione dei ponti termici tra parete e copertura.

C = Angolo tra pareti

Ponte termico	Zona di riferimento	Tipo	Parete di riferimento
Z9	Nuova	C3	M8
Z10	Nuova	C9	M4
Z12	Esistente	C9	M3

I ponti termici appartenenti a questa categoria sono tre ma, quello denominato Z9 risulta essere in realtà utilizzato per un pavimento a sbalzo per semplificazione, mentre Z10 rappresenta gli angoli della parte destinata all'ampliamento e Z12 gli angoli della parte già esistente della sede.

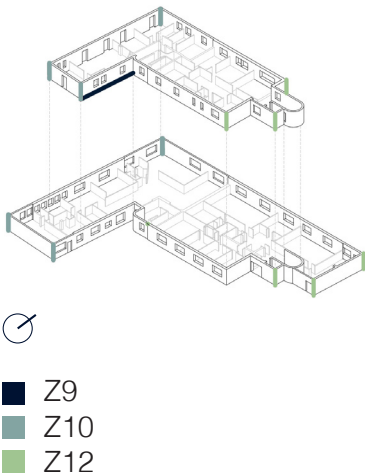


Figura 26:
Piante piano terra e primo con indicazione dei ponti termici in corrispondenza di angoli tra pareti.

Componenti trasparenti:

Le aperture dell'intero edificio sono state inserite all'interno di un abaco dei serramenti, riportato in seguito (**Figura 30 e Figura 31**), che ne indica la denominazione, le dimensioni, l'ubicazione e l'orientamento. In seguito, vengono descritte le caratteristiche del vetro, nello specifico la tipologia del vetro (se singolo, doppio, triplo), la resistenza dell'intercapedine, la conducibilità del distanziale, il fattore di

trasmissione solare ovvero il ggl,n e la trasmissione del vetro in W/m^2k (U_g).

Inoltre, l'abaco serramenti riporta le caratteristiche relative alla tipologia di telaio utilizzato in particolare il tipo di materiale e la trasmissione del telaio in W/m^2k (U_g); per quanto riguarda le schermature viene riportato un fattore tendaggi sempre pari ad uno nella scheda componenti involucro poichè essendo in regime di calcolo dinamico orario questo dato viene estrapolato dalla sezione profilo orario di ogni locale. Infine, viene associato ad ogni tipologia differente di serramento il ponte termico corrispondente di cui si esplicita il nome ed il componente opaco di riferimento.

Per la modellazione dello stato di fatto sono presenti serramenti con vetri doppi per la quasi totalità dell'immobile, mentre per quanto riguarda le schermature sono presenti a piano terra veneziane interne di colore bianco e a piano primo e secondo tende interne di colore bianco.

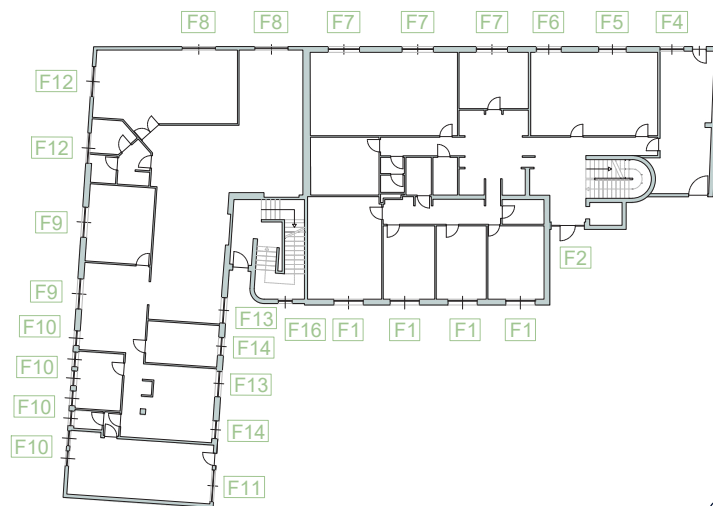


Figura 27
*Pianta piano terra
con indicazione nomenclatura serramenti*

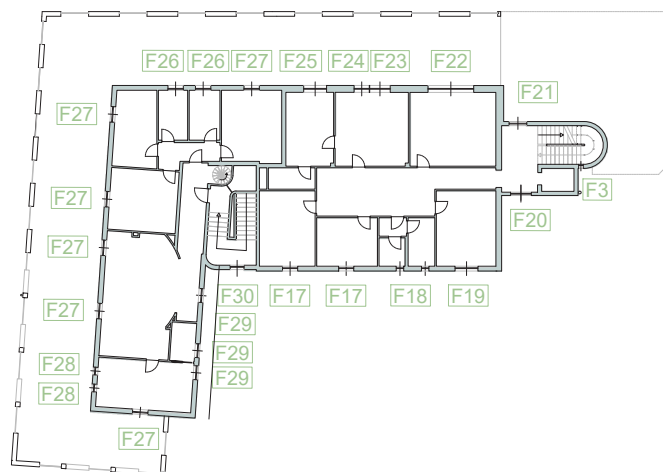


Figura 28
*Pianta piano primo
con indicazione nomenclatura serramenti*

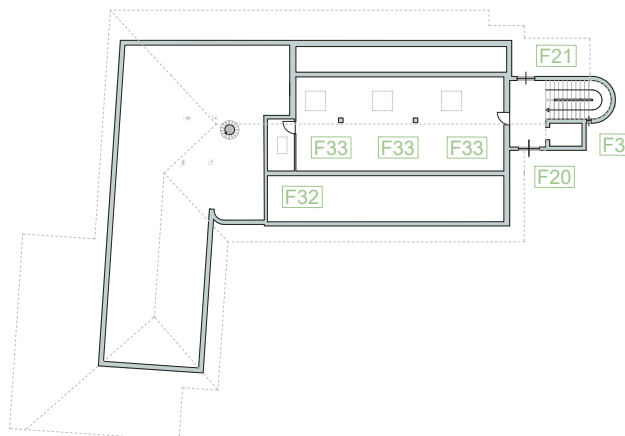


Figura 29
*Pianta piano mansarda
con indicazione nomenclatura serramenti*

FINESTRA					DIMENSIONI FINESTRA										POSIZIONE		
Nome	ID	Piano	Parte	Orientamento	L [cm]	H [cm]	A [cm]	B [cm]	C [cm]	D [cm]	E [cm]	F [cm]	NO	NV	h [m]	Muro	Sotto finestra
F1	PT - finestra 189,5x160	PT	Esistente	Orizzontale	189.5	160	49.5	12.5	12.5	12.5	[-]	14	0	1	0.9	M1	M3
F2	PT - Porta ingresso	PT	Esistente	Verticale	216	259	0	15	4	4	[-]	18	0	2	0	M2	[-]
F3	PT - Finestra 30x835	PT	Esistente	Verticale	30	835	7	7	7	7	100	[-]	1	0	0	M11	[-]
F4	PT - Finestra 154,5x150,5	PT	Esistente	Orizzontale	154.5	150.5	9.5	9.5	9	9	[-]	15	0	1	0.9	M3	M3
F5	PT - Finestra 179x150,5	PT	Esistente	Orizzontale	179	150.5	9.5	9.5	9	9	[-]	15	0	1	0.9	M1	M4
F6	PT - Finestra 162x150,5	PT	Esistente	Orizzontale	162	150.5	9.5	9.5	9	9	[-]	15	0	1	0.9	M1	M4
F7	PT - Finestra 203x150,5	PT	Esistente	Orizzontale	203	150.5	9.5	9.5	9	9	[-]	15	0	1	0.9	M1	M4
F8	PTN - Finestra 215x160	PT	Nuova	Orizzontale	215	160	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M4	[-]
F9	PTN - Finestra 195x155	PT	Nuova	Orizzontale	195	155	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M5	M16
F10	PTN - Finestra 95x155	PT	Nuova	Verticale	95	155	8	8	8	8	[-]	[-]	0	0	0.9	M5	M16
F11	PTN - Finestra 205x150	PT	Nuova	Orizzontale	205	150	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M4	[-]
F12	PTN - Finestra 195x155	PT	Nuova	Orizzontale	195	155	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M4	[-]
F13	PTN - Finestra 165x155	PT	Nuova	Orizzontale	165	155	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M5	[-]
F14	PTN - Finestra 115x155	PT	Nuova	Verticale	115	155	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M5	[-]
F16	PTN - Finestra 90x165	PT	Nuova	Verticale	90	165	7	7	7	7	[-]	[-]	0	0	0.9	M15	[-]
F17	P1 - finestra 98,5x189	P1	Esistente	Verticale	98.5	189	11	11	11.5	11.5	[-]	[-]	0	0	0.9	M8	M8
F18	P1 Finestra 48,5x189	P1	Esistente	Verticale	48.5	189	11	11	11.5	11.5	[-]	[-]	0	0	0.9	M8	M8
F19	P1 - Finestra 148,5x189	P1	Esistente	Verticale	148.5	189	11	11	11	11	[-]	15	0	1	0.9	M8	M8
F20	P1 - Finestra 135x135	P1	Esistente	Quadrata	135	135	8	8	8	8	[-]	12	0	1	0.9	M10	[-]
F21	P1 - Finestra 115x135	P1	Esistente	Verticale	115	135	8	8	8	8	[-]	[-]	0	0	0.9	M11	[-]
F22	P1 - P. Finestra 297,5x223	P1	Esistente	Orizzontale	297.5	223	14.5	14.5	17	17	[-]	10	0	1	0	M7	[-]
F23	P1 - Finestra 137x138,5	P1	Esistente	Verticale	137	138.5	7.5	7.5	6.5	6.5	[-]	[-]	0	0	0.9	M7	M7
F24	P1 - P. Finestra 99x223	P1	Esistente	Verticale	99	223	9.5	9.5	13.5	13.5	[-]	[-]	0	0	0	M7	[-]
F25	P1 - Finestra 148,5x138,5	P1	Esistente	Orizzontale	148.5	138.5	11.5	11.5	11	11	[-]	15	0	1	0.9	M7	M7
F26	P1N - Finestra 100x140	P1	Nuova	Verticale	100	140	15	15	15	15	[-]	[-]	0	0	0.9	M8	M16
F27	P1N - Finestra 100x230	P1	Nuova	Verticale	100	230	15	15	15	15	[-]	[-]	0	0	0	M8	[-]
F28	P1N - Finestra 50x140	P1	Nuova	Verticale	50	140	7	7	7	7	[-]	[-]	0	0	0.9	M8	M16
F29	P1N - 90x185 Finestra	P1	Nuova	Verticale	90	185	15	15	15	15	[-]	[-]	0	0	0.9	M8	M16
F30	P1N - Finestra 90x270	P1	Nuova	Verticale	90	270	7	7	7	7	[-]	[-]	0	0	0	M14	[-]
F31	P2 - Finestra 118x90	P2	Esistente	Orizzontale	118	90	8	8	8	8	[-]	[-]	0	0	0.9	M10	[-]
F32	P2 - 61x113 Lucernario	P2	Esistente	Verticale	61	113	5	5	5	5	[-]	[-]	0	0	[-]	S4	[-]
F33	P2 - 129x133 Lucernario	P2	Esistente	Verticale	129	133	5	5	5	5	[-]	[-]	0	0	[-]	S4	[-]

VETRO						TELAIO		SCHERMATURE			PONTI TERMICI	
Nome	Ug [W/m²K]	g _{gl,n} [-]	Resistenza intercapedine [m²K/W]	Kdistanziale [W/m K]	Tipologia	Materiale	Uf [W/ m²K]	tipologia	gtot [-]	Fattore tendaggi [-]	Nome	Muro
F1	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Veneziana interna	0.415	0.553	Z1	M1
F2	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Assente	[-]	[-]	Z1	M1
F3	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Assente	[-]	[-]	Z1	M1
F4	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Veneziana interna	0.415	0.553	Z1	M1
F5	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Veneziana interna	0.451	0.601	Z1	M1
F6	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Veneziana interna	0.451	0.601	Z1	M1
F7	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	PVC- tre camere	2	Veneziana interna	0.415	0.553	Z1	M1
F8	2.8	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Veneziana interna	0.411	0.548	Z2	M5
F9	2.8	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Veneziana interna	0.411	0.548	Z2	M5
F10	2.8	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Veneziana interna	0.411	0.548	Z2	M5
F11	2.8	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Veneziana interna	0.411	0.548	Z2	M5
F12	2.096	0.67	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	1.6	Assente	[-]	[-]	Z2	M5
F13	2.8	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Veneziana interna	0.411	0.548	Z2	M5
F14	2.8	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Veneziana interna	0.411	0.548	Z2	M5
F16	4.669	0.85	[-]	[-]	Singolo	Metallico - taglio termico	7	Assente	[-]	[-]	Z2	M5
F17	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F18	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F19	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F20	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F21	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F22	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F23	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F24	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F25	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno duro	1.9	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F26	2.8	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno tenero	1.8	Tenda interna	0.512	0.683	Z3	M8
F27	2.8	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno tenero	1.8	Tenda interna	0.512	0.683	Z3	M8
F28	3.1	0.85	[-]	[-]	Singolo	Legno tenero	1.8	Tenda interna	0.545	0.641	Z3	M8
F29	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno tenero	1.8	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F30	2.096	0.75	0.259	0.06	Doppio	Legno tenero	1.8	Tenda interna	0.515	0.687	Z3	M8
F31	2.096	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Tenda interna	0.515	0.687	Z1	M1
F32	2.096	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Tenda interna	0.515	0.687	Z1	M1
F33	2.096	0.75	0.259	0.08	Doppio	Metallico - taglio termico	2.5	Tenda interna	0.515	0.687	Z1	M1

Figura 30 e 31:
Abaco dei serramenti allo stato di fatto.

4.1.2 Impianti

Riscaldamento

Il riscaldamento degli ambienti, per quanto riguarda la sede storica della società, è garantito da una caldaia a gas metano a condensazione, che possiede vita tecnica convenzionale di circa 20 anni: la distribuzione avviene tramite collettori, in buono stato di efficienza, l'emissione del calore è affidata a radiatori funzionanti a media-bassa temperatura, mentre la regolazione del sistema è realizzata mediante centralina climatica con sondo esterno e valvole termostatiche auto-azionate installate sui corpi scaldanti per la modulazione finale della temperatura ambiente.

Per quanto concerne invece la parte dell'edificio su cui insisterà l'ampliamento della **software house** a piano terra il riscaldamento è garantito da una caldaia a gas murale dedicata in cui la distribuzione avviene tramite un impianto a due tubi con poco isolamento e quindi parecchie perdite di calore, l'emissione è affidata a ventilconvettori funzionanti a media/alta temperatura, regolati da un termostato di zona **ON-OFF**.

Analogamente al piano terra, il primo piano dispone di una caldaia a gas murale indipendente della quale la distribuzione è costituita da un impianto a due tubi anch'essi isolati in modo non

adeguato, infine l'emissione avviene tramite radiatori a media/alta temperatura, con regolazione tramite termostato di zona **ON-OFF**.

Raffrescamento

Il raffrescamento estivo per la parte storica dell'edificio è ottenuto tramite unità **split inverter**, installate nei singoli locali del piano terra e con meno di tre anni di periodo di installazione: la distribuzione avviene attraverso un gas frigorifero per tutte le unità interne, l'emissione invece è realizzata tramite split con regolazione modulante per singolo locale; anche il raffrescamento degli ambienti della zona nuova del primo piano è assicurato attraverso le stesse metodologie di generazione, distribuzione, emissione e regolazione.

Ventilazione

La sede storica avendo destinazione d'uso E.2 (Uffici e assimilabili), possiede una ventilazione meccanica controllata realizzata tramite una pompa di calore (circa 5 anni di età) che alimenta i circuiti di trattamento dell'aria. Distribuzione ed emissione avvengono tramite canalizzazioni e bocchette, mentre la regolazione è costituita da una preregolazione centralizzata e da una regolazione locale sulla batteria di trattamento aria. La parte su cui insisterà l'ampliamento invece non presenta un impianto di ventilazione meccanica dell'aria primaria.

Acqua calda sanitaria

La produzione dell'ACS per la zona di uffici già esistente è affidata alla caldaia a condensazione a metano, comune anche al servizio di riscaldamento. Per l'altra metà del fabbricato la produzione di acqua calda sanitaria è garantita da due impianti separati, uno al piano terra e uno al primo piano, ciascuno servito dalla rispettiva caldaia murale a metano.

Impianto solare fotovoltaico

Nella totalità del fabbricato non è presente alcun impianto fotovoltaico.

Altri impianti e servizi

L'illuminazione della prima parte dell'edificio avviene tramite apparecchi con lampade fluorescenti compatte (36 W) dotate di reattore elettronico, mentre l'altra zona vede apparecchi con lampade fluorescenti mono-emissione; è presente, inoltre, per gli uffici un ascensore idraulico con potenza installata di 9 kW.

4.2 Modello dello stato di progetto

Per la modellazione dello stato di progetto, come per quella dello stato di fatto vengono fatte alcune assunzioni e semplificazioni in particolare per quanto riguarda la nomenclatura dei vari piani e spazi rima

ne tutto invariato rispetto a quanto esplicitato nella sezione denominazioni del paragrafo precedente.

Distribuzione e categoria d'uso

Per lo stato di progetto viene utilizzata la divisione degli ambienti interni presente nell'ultimo progetto idealizzato da Edilclima S.r.l che vede locali adibiti ad uffici e assimilabili (categoria E.2) per la totalità dell'immobile, con inserimento di ampie sale riunioni e congressi ed una mensa ad uso esclusivo dei dipendenti.

Zone termiche

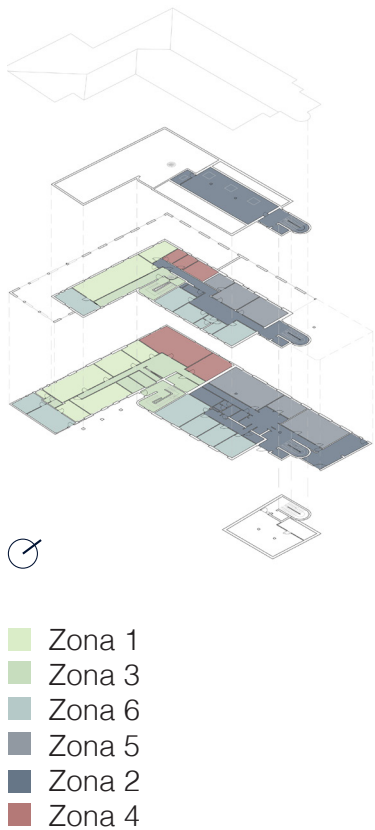


Figura 32:
Esploso delle piante dei vari piani dell'edificio in assonometria, che esplicita la suddivisione in zone termiche.

Numero	Descrizione	Superficie netta [m²]	Volume lordo [m³]	Superficie lorda	S/V [m⁻¹]
1	PT1N Bagni e assimilabili	139.25	540.55	259.11	0.48
2	PT-1-2 Locali servizio- Interno	324.10	1229.16	611.98	0.5
3	PT1N Uffici Est- Ovest	266.12	1249.82	694.25	0.56
4	PT1N Uffici Nord	119.95	563.89	339.80	0.6
5	PT-1 – Uffici Nord	171.99	810.36	442.40	0.55
6	PT-1 – Uffici Sud	138.87	638.53	311.74	0.49

Per la suddivisione dell'edificio in zone termiche, come in precedenza viene presa in considerazione sia l'esposizione del locale considerato sia la sua funzione : vengono così individuate 6 nuove zone termiche, 3 per la parte esistente e 3 per l'ampliamento, come si può vedere in **Figura 32**.

4.2.1 Involucro

Componenti opachi

I componenti opachi differiscono da quelli dell'edificio allo stato di fatto solo per la presenza in progetto di un cappotto esterno di 16 cm di spessore realizzato in polistirene espanso sinterizzato (EPS 80) che presenta una conduttività di 0,031 W/mK ed una resistenza termica di 5,161 W/m²K. I solai interpiano, la copertura, il piano interrato e tutti gli altri componenti opachi rimangono invariati.

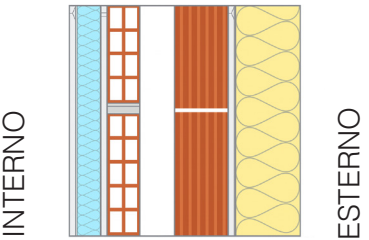


Figura 33:
Muratura tipo verso esterno, spessore 54 cm, trasmittanza 0,136 W/m²K.

Componenti trasparenti

Quasi tutte le aperture dell'edificio vengono cambiate in modo da avere valori di trasmittanza totale del serramento (vetro più telaio) inferiore rispetto allo stato di fatto. La denominazione, le dimensioni, l'ubicazione, l'orientamento, le schermature ed il fattore tendaggi rimangono invariate di seguito viene riportato l'elenco di come variano le trasmittanze [W/m²K] dallo stato di fatto allo stato di progetto:

F1	da 2.18	a 1.18
F2	2.46	invariato
F3	2.41	invariato
F4	da 2.27	a 1.21
F5	da 2.25	a 1.19
F6	da 2.26	a 1.20
F7	da 2.24	a 1.18
F8	da 2.96	a 1.30
F9	da 2.97	a 1.30
F10	da 2.96	a 1.30
F11	da 2.96	a 1.30
F12	da 2.22	a 1.30
F13	da 2.98	a 1.30
F14	da 3.03	a 1.30
F16	da 5.20	a 1.30
F17	da 2.19	a 1.10
F18	da 2.24	a 1.10
F19	da 2.22	a 1.10
F20	2.27	invariato
F21	da 2.22	a 1.69
F22	da 2.16	a 1.10
F23	da 2.22	a 1.10
F24	da 2.18	a 1.10
F25	da 2.22	a 1.10
F26	da 2.50	a 1.73
F27	da 2.55	a 1.70
F28	2.64	invariato

F29	da 2.12	a 1.52
F30	da 2.20	a 1.30
F31	2.33	invariato
F32	2.68	invariato
F33	2.47	invariato

Ponti termici

I ponti termici per quanto riguarda la tipologia rimangono invariati, cambiano dal punto del loro valore in corrispondenza dei ponti termici intorno ai serramenti sostituiti e quelli che insistono sulle pareti a cui viene applicato il cappotto esterno.

4.2.2 Impianti

Riscaldamento e Raffrescamento

In questo caso la caldaia a condensazione e le unità a split inverter vengono sostituiti con una pompa di calore acqua – acqua, ovvero un sistema di climatizzazione, che gestisce sia il riscaldamento che il raffrescamento, alimentato dall'acqua di falda individuata tramite apposita indagine geologica, infatti l'utilizzo di questa risorsa naturale consente di rinunciare totalmente ai generatori a gas e di adottare una tecnologia ad alta efficienza, stabile nelle prestazioni sia in inverno sia in estate. L'emissione avviene tramite terminali ventilati ottimizzati per funzionamento a bassa temperatura dell'acqua e con ventilazione ridotta, così da massimizzare l'efficienza dell'intero sistema idronico. La pompa di

calore provvede infatti a entrambe le funzioni, sfruttando la temperatura costante della falda per migliorare i rendimenti stagionali (COP ed EER elevati).

Ventilazione

Il nuovo assetto impiantistico prevede due sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) distinti: uno dedicato all'edificio esistente e un secondo destinato all'ampliamento. La nuova unità, collocata al secondo piano del corpo ampliato, gestisce anche alcuni locali della sede attuale, consentendo di riequilibrare le portate e migliorare la distribuzione dell'aria.

Entrambe le VMC sono dotate di sezioni filtranti, batterie di pretrattamento collegate alla pompa di calore per il riscaldamento e la deumidificazione estiva, recuperatore di calore (per la macchina dell'ampliamento). Questa configurazione garantisce un miglioramento della qualità dell'aria *indoor* e una maggiore integrazione con il sistema di climatizzazione, contribuendo alla riduzione dei consumi energetici e all'incremento del *comfort* ambientale.

Acqua calda sanitaria:

La produzione di acqua calda sanitaria è affidata a due pompe di calore con accumulo installate direttamente nei servizi igienici. La scelta consente di evitare il ricircolo presente nel vecchio impianto, eliminando

le dispersioni termiche presenti in precedenza e migliorando l'efficienza complessiva del sistema. L'acqua di falda rappresenta anche in questo caso la sorgente rinnovabile impiegata per la generazione, riducendo consumi ed emissioni rispetto a soluzioni tradizionali.

Impianto Fotovoltaico

Sulla copertura sud dell'edificio è prevista l'installazione di 40 pannelli fotovoltaici da 550 W ciascuno, per una potenza complessiva di 22 kW.

4.3 Specifiche di modellazione delle strategie resilienti

In coerenza con quanto citato in precedenza all'interno del flusso metodologico delineato nel capitolo 3 il flusso l'ultima fase del processo di lavoro rappresenta il momento in cui convergono modellazione energetica, strategie di mitigazione e adattamento e valutazione della resilienza dell'edificio nel lungo periodo. In questa fase il modello aggiornato allo stato di progetto viene assunto come una nuova condizione di riferimento: esso diventa quindi il *"nuovo stato di fatto"*, dal quale far derivare ulteriori scenari di riqualificazione orientati a incrementare progressivamente la resilienza

energetica dell'edificio rispetto agli anni climatici tipo adottati (2010, 2050 e 2090) e, più in generale, rispetto alle condizioni climatiche future; tutto questo in accordo con l'approccio dei processi di *Resilient Cooling Design* descritti nelle linee guida di *Annex 80* [72]: in cui la valutazione delle prestazioni non si limita al funzionamento in condizioni ordinarie, ma deve comprendere la risposta dell'edificio a eventi di stress termico.

In quest'ottica, l'individuazione delle strategie di intervento assume un carattere multidimensionale: ciascuna misura non è valutata isolatamente rispetto al risparmio energetico, ma per la sua capacità di ridurre la vulnerabilità, incrementare la robustezza del sistema e favorire il recupero delle condizioni di comfort dopo un evento critico. Le strategie proposte dalla documentazione di *Annex 80* [72], che includono la riduzione dei carichi termici, il raffrescamento passivo, i sistemi attivi ad alta efficienza, il controllo adattivo e gli interventi alla scala urbana, costituiscono una matrice concettuale utile alla definizione degli scenari di progetto.

Tra le strategie selezionate in questo lavoro vediamo l'utilizzo di: schermature per il controllo della radiazione solare, facciate fredde e ventilazione naturale controllata, ognuna di queste soluzioni viene tradotta in una variante progettuale del modello energetico,

costruita mantenendo invariata destinazione d'uso e profili di occupazione. Tale scelta metodologica permette un confronto diretto e scientificamente robusto tra le diverse soluzioni, isolando gli effetti termici e prestazionali specifici di ogni intervento.

4.3.1 Schermature solari

La prima strategia esplorata riguarda l'introduzione di sistemi di schermatura solare applicati alle superfici vetrate più esposte: tale scelta risponde all'indicazione, presente nella documentazione *Annex 80* [72], secondo cui il controllo della radiazione incidente rappresenta uno dei metodi più efficaci per ridurre i carichi termici e mitigare il rischio di surriscaldamento estivo. Le schermature mobili o regolabili, in particolare, permettono di modulare il fattore solare in funzione delle condizioni climatiche e delle esigenze di illuminazione naturale, migliorando al contempo la resilienza dell'edificio grazie alla loro capacità di limitare l'ingresso di energia termica anche in condizioni di potenziali guasti degli impianti.

Per la modellazione energetica è stato mantenuto costante il rapporto aeroilluminante e il profilo di utilizzo, agendo esclusivamente sul parametro che esprime l'efficacia della schermatura, in conformità alla metodologia indicata nella norma UNI 11300-1:2014 [73].

[72] IEA EBC Annex 80, *Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials*, IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Vienna University of Technology, 2020.

[73] Ente Nazionale Italiano, UNI 11300-1:2014 - *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva*, Milano, 2014.

Il contributo delle schermature viene valutato attraverso il fattore di riduzione dei tendaggi, definito come:

$$FR = g_{gl+sh} / g_{gl}$$

Dove:

- FR è il fattore di riduzione o fattore tendaggi
- g_{gl+sh} è la trasmittanza di energia solare totale della finestra, quando la schermatura solare è utilizzata
- g_{gl} è la trasmittanza di energia solare totale della finestra, quando la schermatura solare non è utilizzata

Per quanto riguarda lo stato di progetto, delle condizioni specifiche dell'edificio e delle caratteristiche dei sistemi scelti, è stato adottato un fattore tendaggi pari a:

$$FR = 0.36/0.51$$

$$FR = 0.69$$

Il modello realizzato con le schermature migliorate invece segue le indicazioni espresse all'interno del documento "*Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials*" [74] in cui viene esplicitato che il valore di fattore solare g_{tot} , ovvero quello definito in precedenza come $g_{gl} + sh$ risulta essere efficace se compreso tra 0.10 e 0.15 e risulta particolarmente efficace sul confort termico se il valore assunto è proprio 0.10. Quindi il fattore tendaggi per questo modello energetico viene calcolato come:

$$FR = 0.1/0.51$$

$$FR = 0.20$$

Inoltre, vengono modificati i profili orari di attivazione della schermatura, creando dei periodi speciali personalizzati sul software EC700, che vedono suddiviso l'anno in due periodi: periodo invernale dal 16/10 al 14/04 ed un periodo estivo che va dal 15/04 al 15/10 e sono definiti in questo modo:

- Periodo estivo, sabato e festivi: schermature sempre chiuse
- Periodo estivo, feriali: schermature sempre chiuse dalle 19:00 alle 7:00 e chiuse durante le ore lavorative in base all'esposizione, per schermare e mantenere confort visivo interno
- Periodo invernale, sabato e festivi: schermature sempre aperte
- Periodo invernale, feriali: schermature sempre aperte dalle 19:00 alle 7:00 e chiuse durante le ore lavorative in base all'esposizione, per schermare e mantenere confort visivo interno

Tale impostazione consente di massimizzare i guadagni solari durante i fine settimana e le ore non lavorative invernali, e di minimizzarli in estate durante i fine settimana e gli orari non lavorativi, con conseguenti benefici in termini di carico termico estivo, numero di ore di surriscaldamento.

4.3.1 Superfici ad alta riflettanza solare

La seconda strategia riguarda l'impiego di superfici

[74] IEA EBC Annex 80, *Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials*, IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Vienna University of Technology, 2020.

con una elevata riflettanza solare anche dette “*cool façades*”, appartenenti al gruppo dei materiali e sistemi ad alta riflettanza superficiale descritti nel *Technology Profiles Report di Annex 80* [75].

Si tratta di soluzioni denominate CEM ovvero “*Cool Envelope Materials*”, basate sull'utilizzo di rivestimenti caratterizzati da elevata *solar reflectance* (SR), in grado di ridurre la quota di energia solare assorbita dalla pelle edilizia e di limitare l'innalzamento della temperatura superficiale della facciata.

Tali materiali contribuiscono alla mitigazione termica attraverso tre meccanismi principali:

1. Riduzione dell'assorbimento solare, che abbassa la temperatura superficiale dell'involucro;
2. Minore trasmissione del calore alle stratigrafie interne, con conseguente riduzione del carico termico per conduzione;
3. Incremento della capacità di irraggiamento della superficie verso la volta celeste, soprattutto nelle ore serali e notturne.

Nel modello energetico sviluppato, i parametri geometrici e materici dell'involucro sono stati mantenuti invariati, intervenendo esclusivamente sul fattore di assorbimento (α) che viene considerato pari a 0.15 per tutti i componenti verticali opachi di tipo T (da locali climatizzati verso esterno) e di tipo E (da locale non

climatizzato verso esterno), poiché nella direttiva di *Annex 80* sul raffrescamento resiliente viene indicato un fattore efficace di riflessione solare (SR) compreso tra 0.60 e 0.95, quindi:

$$= 1 - SR$$

$$= 1 - 0.85$$

$$= 0.15$$

L'utilizzo di superfici ad alta riflettanza solare contribuisce quindi alla mitigazione delle temperature superficiali e alla riduzione dei guadagni solari sull'involucro, rafforzando la capacità dell'edificio di limitare l'accumulo termico nei periodi più critici.

4.3.1 *Ventilative Cooling*

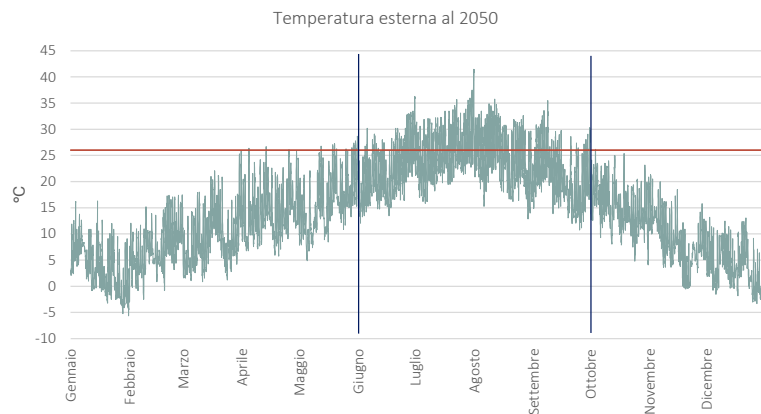
La terza strategia adottata riguarda l'implementazione del *Ventilative Cooling* come misura di raffrescamento passivo, coerente con il gruppo “*Removing sensible heat from the indoor environment*” discusso nelle linee guida di *Annex 80* [75]. Tale tecnica sfrutta il ricambio d'aria per rimuovere calore sensibile, immettendo aria esterna a temperatura più bassa e favorendo il deflusso di aria calda interna attraverso differenze di pressione o gradiente termico.

Per determinare un fattore di moltiplicazione dei volumi ora reali viene preso in considerazione quanto esplicitato nella procedura prescritta dalla UNI 11300-

[75] IEA EBC Annex 80, *Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials*, IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Vienna University of Technology, 2020.

Figura 34:

Andamento delle temperature esterne all'anno 2050 dei file climatici utilizzati, con indicazione della temperatura di 26 °C come limite di riferimento per l'accensione dell'impianto di raffrescameto.



1:2014, che disciplina la ventilazione manuale e automatizzata durante le ore notturne nei periodi estivi.

La norma prevede che:

- la ventilazione naturale sia attivata tra le 23:00 e le 7:00
- il valore di ricambio d'aria effettivo venga calcolato come:

$$n_{\text{eff}} = 1,5 * n$$

Dove:

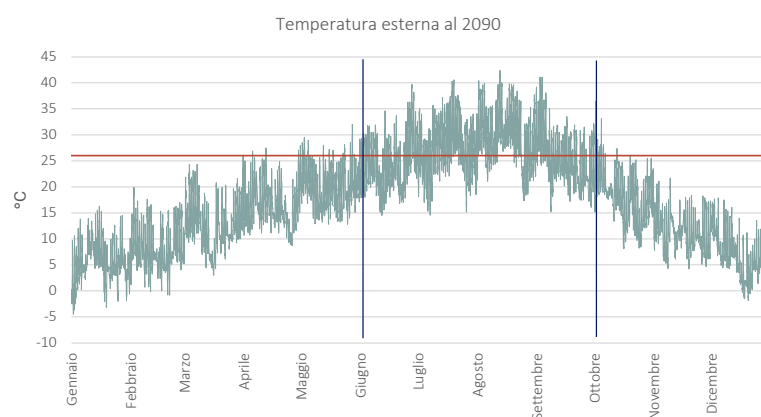
- n è il tasso di ventilazione nominale [vol/h],
- coefficiente 1,5 rappresenta il fattore correttivo che tiene conto dell'efficacia reale dello scambio d'aria nelle ore notturne.

Il modello energetico è stato quindi configurato imponendo un ricambio potenziato nelle ore notturne, limitatamente al periodo estivo da giugno a settembre, e applicato esclusivamente nei giorni feriali, in coerenza con l'effettivo utilizzo dell'edificio che ospita uffici operativi dal lunedì al venerdì.

Il periodo di riferimento adottato è Giugno - Settembre a seguito di un'analisi sull'andamento delle temperature esterne fatta all'anno 2050 (**Figura 34**) e all'anno 2090 (**Figura 35**); emerge come i mesi di Giugno, Luglio, Agosto e Settembre siano quelli in cui le temperature esterne durante il giorno, superino maggiormente il valore di riferimento per l'accensione degli impianti

Figura 34:

Andamento delle temperature esterne all'anno 2090 dei file climatici utilizzati, con indicazione della temperatura di 26 °C come limite di riferimento per l'accensione dell'impianto di raffrescameto.



di raffrescamento di 26 °C. Tutti gli altri parametri relativi a occupazione, profili d'uso e **set-point** sono stati mantenuti invariati al fine di isolare l'efficacia della sola strategia di ventilazione.

Va tuttavia evidenziato che il software di simulazione energetica utilizzato, EC700, presenta una limitazione intrinseca nella gestione della ventilazione controllata: il programma permette infatti di definire finestre temporali di ventilazione (come nel caso del periodo speciale impostato da giugno a settembre), ma non consente di attivare la ventilazione solo quando la temperatura esterna risulta inferiore a quella interna.

Questa caratteristica può comportare una lieve sovrastima del flusso d'aria effettivamente utile ai fini del raffrescamento passivo, ma non compromette la validità dell'analisi comparativa, poiché la limitazione si applica in modo identico a tutti gli scenari modellati.

L'obiettivo rimane quello di simulare un sistema di ventilazione notturna controllata in grado di sfruttare la massa termica dell'edificio per dissipare il calore accumulato durante il giorno, valutandone l'efficacia nel ridurre le temperature interne e nel migliorare la resilienza termica dell'edificio in condizioni climatiche attuali e future.

Questo ultimo modello energetico rappresenta l'integrazione di tutte le strategie descritte in precedenza; quindi, racchiude ed utilizza:

- Per quanto riguarda la schermature: un fattore tendaggi pari a 0.20 con attivazione delle schermature secondo i profili orari speciali descritti nel paragrafo 4.3.1.
- Per quanto riguarda le superfici ad alta riflettanza solare: un fattore di assorbimento pari a 0.15 per tutte le strutture opache verticali di tipo T ed E.
- Per quanto riguarda il **ventilative cooling**: una ventilazione meccanica dalle ore 23:00 alle ore 7:00 del mattino da giugno a settembre nei giorni feriali con valore di ricambio d'aria effettivo pari al 150% del valore reale.

4.3.4 Strategie combinate

Il primo passo dell'analisi è consistito nella realizzazione di tutti i modelli energetici descritti nel capitolo precedente dell'elaborato di tesi, con l'obiettivo di confrontarli sia singolarmente sia all'interno di una visione più ampia, utile a interpretare l'andamento complessivo dei risultati.

È importante precisare che ogni modello energetico è stato sviluppato in tre configurazioni differenti: con gli impianti dimensionati alla loro reale potenza di progetto, con impianti a potenza illimitata e, infine, con impianti completamente spenti. Questa scelta metodologica consente di indagare aspetti e indicatori diversi, approfondendo il comportamento dell'edificio in condizioni operative differenti.

Come primo passaggio, la modellazione energetica per ogni tipologia del modello del caso studio è stata eseguita assumendo un impianto a potenza illimitata: tale impostazione è stata adottata per isolare e valutare le prestazioni dell'involucro edilizio senza che esse fossero influenzate dai limiti impiantistici. In questo modo è stato possibile

formulare considerazioni "assolute" sul comportamento termico dell'edificio, valutando la reale qualità dell'involucro in termini di fabbisogni e dispersioni.

Successivamente, il modello è stato rielaborato introducendo gli impianti con la loro potenza di progetto: questa configurazione rappresenta la situazione più aderente alla realtà e permette di analizzare il funzionamento effettivo dei sistemi impiantistici, nonché la loro efficienza e la capacità di soddisfare i carichi termici previsti. Tale passaggio risulta fondamentale per comprendere come l'edificio-impianto opererà concretamente, individuando eventuali criticità o margini di miglioramento.

Infine, è stata condotta un'ultima simulazione considerando gli impianti totalmente spenti: questa analisi "a involucro nudo" consente di esaminare più nel dettaglio il livello di *comfort* termo-igrometrico interno garantito esclusivamente dall'involucro edilizio. È inoltre utile per individuare, ad esempio, le ore o i periodi dell'anno in cui sarebbe necessario attivare gli impianti per garantire condizioni



accettabili di benessere interno, qualora l'edificio fosse privo di sistemi di climatizzazione attivi.

registrate.

Tutti i valori così selezionati vengono racchiusi all'interno della seguente tabella (*Figura 34*).

5.1 Indicatori relativi al fabbricato

Per iniziare vengono commentati i risultati relativi all'involucro edilizio realizzati in regime di impianto a potenza illimitata, per le motivazioni descritte in precedenza. Le variabili o KPI che vengono prese in considerazione sono:

- i fabbisogni di energia per riscaldamento e raffrescamento normalizzati, ovvero gli indici di prestazione termica utile per il raffrescamento e per il riscaldamento dell'intero caso studio

La tabella, visibile nella pagina successiva in *Figura 35* invece, riporta i valori dei KPI relativi alle diverse strategie di intervento, confrontati con lo stato di progetto per il medesimo anno di riferimento.

Dall'analisi emerge che tutte le soluzioni adottate determinano una riduzione degli indici di prestazione termica per il raffrescamento sia al 2050 sia al 2090. Le diminuzioni risultano però leggermente più marcate al 2050, segnalando una maggiore efficacia delle strategie di raffrescamento resiliente con condizioni climatiche più vicine a quelle attuali, rispetto agli scenari più estremi previsti per il 2090.

Figura 34:

Tabella riassuntiva di tutti gli indicatori presi in esame, relativi al fabbricato del caso studio preso in esame.

- le potenze massime di picco sia quella invernale che quella estiva con il mese di riferimento in cui vengono

Un comportamento analogo si osserva nelle potenze di picco per il raffrescamento, ad eccezione del **ventilative cooling**. Questa strategia,

Modello	Dati climatici di riferimento	Qh,nd [kWh]	EPH,nd [kWh/m²anno]	Qc,nd [kWh]	EPC,nd [kWh/m²anno]	Pot. Max. H [W]	Mese di riferimento	Pot. Max. C [W]	Mese di riferimento
S.D.F	UNI10349-1	98113	83.90	-8163	-6.98	192249	Dicembre	43482	Luglio
	2010	91433	78.19	-9236	-7.90	190790	Dicembre	52828	Luglio
	2050	81542	69.73	-13818	-11.82	159651	Gennaio	58632	Luglio
	2090	58237	49.80	-28222	-24.13	138848	Gennaio	92777	Agosto
S.D.P	2010	27150	23.40	-11526	-9.93	161260	Dicembre	50045	Luglio
	2050	23713	20.44	-15606	-13.45	142903	Dicembre	60882	Luglio
	2090	16247	14.00	-28360	-24.44	117347	Gennaio	85750	Agosto
S.D.P. + SCHERMATURE	2050	25439	21.92	-12257	-10.56	147626	Dicembre	57391	Luglio
	2090	17566	15.14	-24194	-20.85	117786	Gennaio	73144	Agosto
S.D.P. + SUPERFFICI ALTA RIFLETTANZA	2050	24893	21.45	-14580	-12.57	146173	Dicembre	59820	Luglio
	2090	17240	14.86	-27001	-23.27	120142	Gennaio	82799	Agosto
S.D.P. + VENTILATIVE COOLING	2050	23723	20.45	-14360	-12.38	143162	Dicembre	60760	Luglio
	2090	16250	14.01	-28069	-24.19	117488	Gennaio	91542	Agosto
S.D.P. + STRATEGIE COMBinate	2050	26627	22.95	-10509	-9.06	151157	Dicembre	56240	Luglio
	2090	18472	15.92	-22686	-19.55	120576	Gennaio	74812	Agosto

	KPI Involucro	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	EP _{H,nd} [kWh/m²anno]	23.4	20.4	14.0
	EP _{C,nd} [kWh/m²anno]	9.9	13.5	24.4
	Pot _{max,H} [kW]	161	143	117
	Pot _{max,C} [kW]	50	61	86
1. Schermature solari	EP _{H,nd} [kWh/m²anno]	[-]	+7% 21.9	+8% 15.1
	EP _{C,nd} [kWh/m²anno]	[-]	-21% 10.6	-15% 20.9
	Pot _{max,H} [kW]	[-]	+3% 148	+0.4% 117
	Pot _{max,C} [kW]	[-]	-6% 57	-15% 73
2. Sup. alta riflettanza	EP _{H,nd} [kWh/m²anno]	[-]	+5% 21.5	+6% 14.9
	EP _{C,nd} [kWh/m²anno]	[-]	-7% 12.6	-5% 23.3
	Pot _{max,H} [kW]	[-]	+2% 146	+2% 120
	Pot _{max,C} [kW]	[-]	-2% 60	-3% 83
3. Ventilative cooling	EP _{H,nd} [kWh/m²anno]	[-]	20.5	14.0
	EP _{C,nd} [kWh/m²anno]	[-]	-8% 12.4	-1% 24.2
	Pot _{max,H} [kW]	[-]	143	117
	Pot _{max,C} [kW]	[-]	-0.2% 61	+7% 92
4. Soluzione 1+2+3	EP _{H,nd} [kWh/m²anno]	[-]	+12% 22.9	+14% 15.9
	EP _{C,nd} [kWh/m²anno]	[-]	-33% 9.1	-20% 19.6
	Pot _{max,H} [kW]	[-]	+6% 151	+3% 121
	Pot _{max,C} [kW]	[-]	-8% 56	-13% 75

Figura 35:

Tabella comparativa delle diverse strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto e percentuale, di una determinata variabile rispetto allo stato di progetto, riferita allo stesso anno che viene preso in considerazione.

infatti, si basa sull'immissione di aria esterna, che nella proiezione al 2090 presenta temperature superiori a quelle interne anche nelle ore notturne, riducendone la capacità di raffrescare l'ambiente.

Per quanto riguarda gli indici di prestazione termica le potenze di picco per il riscaldamento, si registra invece un lieve incremento per le schermature e per le superfici ad alta riflettanza. Nel caso delle schermature, ciò è legato alla possibile riduzione degli apporti solari nelle mezze stagioni, dovuta a fattori di oscuramento più incisivi e ai nuovi profili orari; nel secondo caso, invece, la temperatura limite esterna dell'involucro non solo in estate ma anche in inverno, comportando un aumento del fabbisogno termico.

Il **ventilative cooling** si conferma l'unica strategia che

non determina incrementi negli indici di riscaldamento né nelle potenze di picco, poiché non modifica direttamente le caratteristiche termiche dell'involucro edilizio.

La tabella riportata in **Figura 36**, nella pagina successiva, confronta le differenti strategie di intervento con il modello allo stato di progetto riferito al 2010, assumendo tale soluzione come un nuovo stato di fatto, ovvero come nuova **base-line**, con l'obiettivo di valutare in modo più diretto la resilienza climatica dell'involucro edilizio, così come definita nel presente elaborato, fornendo un quadro comparativo più chiaro e approfondito degli effetti che ciascuna strategia può generare sul comportamento dell'edificio.

Il paragone con lo scenario 2010 permette infatti di evidenziare in modo evidente come l'evoluzione delle

Figura 36:

Tabella comparativa delle diverse strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto e percentuale, di una determinata variabile rispetto allo stato di progetto all'anno 2010.

	KPI Involucro	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	23.4	-13% 20.4	-40% 14.0
	EP _{C,nd} [kWh/m ² anno]	9.9	+35% 13.5	+146% 24.4
	Pot _{max,H} [W]	161	-11% 143	-27% 117
	Pot _{max,C} [W]	50	+22% 61	+71% 86
1. Schermature solari	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	-6% 21.9	-35% 15.1
	EP _{C,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	+6% 10.6	+110% 20.9
	Pot _{max,H} [W]	[-]	-8% 148	-27% 117
	Pot _{max,C} [W]	[-]	+15% 57	+46% 73
2. Sup. alta riflettanza	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	-8% 21.5	-37% 14.9
	EP _{C,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	+26% 12.6	+134% 23.3
	Pot _{max,H} [W]	[-]	-9% 146	-25% 120
	Pot _{max,C} [W]	[-]	+20% 60	+65% 83
3. Ventilative cooling	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	-13% 20.5	-40% 14.0
	EP _{C,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	+25% 12.4	+144% 24.2
	Pot _{max,H} [W]	[-]	-11% 143	-27% 117
	Pot _{max,C} [W]	[-]	+21% 61	+83% 92
4. Soluzione 1+2+3	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	-2% 22.9	-32% 15.9
	EP _{C,nd} [kWh/m ² anno]	[-]	-9% 9.1	+97% 19.6
	Pot _{max,H} [W]	[-]	-6% 151	-25% 121
	Pot _{max,C} [W]	[-]	+12% 56	+49% 75

condizioni climatiche influenzeranno le prestazioni dell'edificio nel tempo.

Rispetto alla tabella precedente, si osserva un'inversione completa delle tendenze: l'innalzamento progressivo delle temperature fa sì che gli indici di prestazione termica per il riscaldamento, così come per le relative potenze di picco, risultino sempre migliorati rispetto al 2010.

Al contrario, gli indici di prestazione per il raffrescamento mostrano un progressivo peggioramento in tutte le strategie, con incrementi che, nello scenario 2090, superano in molti casi il 100%, evidenziando una forte criticità dell'involucro rispetto ai futuri carichi estivi.

L'unica configurazione che mostra un miglioramento contemporaneo sia degli indici relativi al riscalda-

mento sia di quelli inerenti al raffrescamento è quella che integra tutte le strategie simultaneamente. Tale comportamento positivo, tuttavia, si verifica soltanto per il modello ambientato al 2050. Nello scenario più estremo del 2090, infatti, anche questa soluzione complessiva riprende a mostrare un aumento degli indici di prestazione per il raffrescamento, segno che le condizioni climatiche previste potrebbero superare la capacità compensativa dell'involucro, anche quando fortemente potenziato.

Per rendere più chiara la comprensione del comportamento dell'involucro per le varie soluzioni ai vari anni di riferimento vengono realizzati due istogrammi: uno per l'anno 2050 (**Figura 37 e 38** della pagina successiva) ed uno per il 2090 in cui tutte le strategie vengono comparate con lo stato di progetto al 2010 per avere

un ulteriore confronto e capire meglio l'andamento delle soluzioni.

Nell'istogramma all'anno 2050 viene tradotto in immagine quello che è emerso precedentemente nel commento delle tabelle 35 e 36 ovvero che tutte le soluzioni adottate stanno riducendo il fabbisogno di energia per il riscaldamento rispetto all'anno 2050 di progetto, ma solo il modello con l'insieme di tutte le strategie risulta essere resiliente, ovvero avere un indice di prestazione termica per il raffrescamento inferiore rispetto allo stato di progetto al 2010. Per il riscaldamento invece in termine assoluto tutte le soluzioni sono resilienti ma rispetto allo stato di progetto al 2010 solo il ventilative cooling non incrementa i valori degli indici; la soluzione finale (Progetto +1 + 2 + 3) risulta essere quella più peggiorativa in termini di riscaldamento poiché sta sommando tutti gli incrementi di fabbisogno invernale dovuti alle altre soluzioni.

Nell'istogramma relativo all'anno 2090 si osserva che tutte le barre risultano traslate verso sinistra rispetto

a quelle del 2050: questo indica che l'involucro dell'edificio di riferimento continuerà a migliorare le proprie prestazioni invernali, poiché le temperature esterne, in assenza di un effettivo piano di decarbonizzazione, tenderanno ad aumentare progressivamente.

Al contrario, le prestazioni estive peggioreranno in modo significativo, pur mostrando comunque un miglioramento rispetto allo stato di progetto nel 2090, nessuna delle soluzioni adottate consente di raggiungere un comportamento resiliente; infatti, anche il modello energetico che integra tutte le strategie analizzate presenta valori parecchio maggiorativi rispetto a quelli dello stato di progetto del 2010, evidenziando un divario consistente.

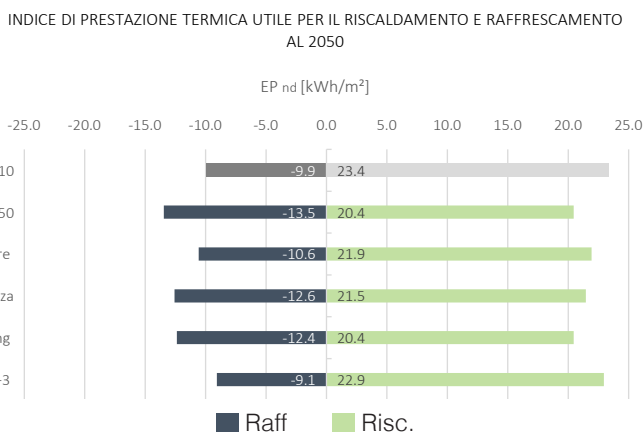


Figura 37:

Istogramma comparativo delle diverse strategie al 2050 rispetto allo stato di progetto al 2010, con l'indicazione degli indici di prestazione termica utile per il riscaldamento e raffrescamento.

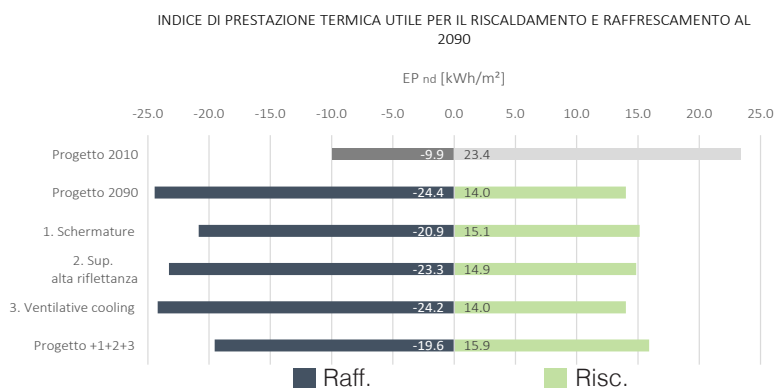


Figura 38:

Istogramma comparativo delle diverse strategie al 2090 rispetto allo stato di progetto al 2010, con l'indicazione degli indici di prestazione termica utile per il riscaldamento e raffrescamento.

5.2 Indicatori relativi al sistema edificio - impianto

La seconda fase dell'analisi riguarda la valutazione del comportamento del sistema edificio-impianto: anche in questo caso vengono adottati appositi indicatori di prestazione (KPI) che consentono di valutare l'efficacia delle diverse strategie di intervento in relazione sia agli scenari climatici futuri sia allo stato di progetto assunto come riferimento. I KPI presi in esame sono calcolati con un impianto a potenza reale e sono:

- Energia primaria rinnovabile
- Energia primaria non rinnovabile
- Energia primaria per il riscaldamento
- Energia primaria per il raffrescamento
- Energia primaria totale
- Energia consegnata al generatore di calore,

suddivisa nelle sue componenti elettrica, da fotovoltaico e da ambiente esterno (quota intercettata tramite pompa di calore).

Tutti questi indicatori vengono riportati e confrontati tra le diverse configurazioni simulate all'interno della tabella dedicata (**Figura 39**).

La tabella, visibile nella pagina successiva in **Figura 40** invece, riporta come quelle in precedenza i valori dei KPI relativi alle diverse strategie di intervento, confrontati con lo stato di progetto per il medesimo anno di riferimento.

In questo caso si può vedere come l'andamento delle percentuali dell'energia primaria per il raffrescamento ed il riscaldamento ricalca in maniera fedele quello che succedeva lato involucro, ovvero grazie alle strategie adottate diminuisce l'energia necessaria per raffrescare l'edificio, soprattutto nel modello combinato ma anche parecchio nel modello con le sole schermature, ma

Figura 39:
Tabella riassuntiva di tutti i parametri presi in considerazione per la valutazione del sistema edificio-impianto del caso studio preso in esame.

Modello	Dati climatici di riferimento	EP,nren [kWh/m²anno]	EP,ren [kWh/m²anno]	EPH,tot [kWh/m²anno]	EPC,tot [kWh/m²anno]	EP,tot [kWh/m²anno]	Qdel [kWh]				
							Energia elettrica	Metano	Solare fotovoltaico	Ambiente esterno	Totale
S.D.F	UNI10349-1	132.6	9.0	87.6	6.2	141.6	22469	105925	0	0	128394
	2010	126.4	9.0	81.8	6.2	135.4	22433	99145	0	0	121578
	2050	120.7	9.6	74.0	9.1	130.3	23816	90228	0	0	114044
	2090	106.6	11.2	53.8	17.4	117.7	27782	67112	0	0	94894
S.D.P	2010	26.6	40.6	19.4	4.1	67.2	15851	0	23751	16667	56269
	2050	26.7	39.9	17.1	6.1	66.6	15896	0	24117	15463	55476
	2090	31.1	38.3	11.3	14.8	69.4	18505	0	24286	12336	55127
S.D.P. + SCHERMATURE	2050	26.2	40.4	18.8	4.6	66.6	15587	0	23932	16350	55869
	2090	29.8	38.4	12.7	12.6	68.2	17703	0	24124	13046	54873
S.D.P. + SUP. ALTA RIFLETTANZA	2050	26.8	40.3	18.1	5.6	67.1	15933	0	24034	16011	55978
	2090	30.9	38.6	12.3	14.1	69.5	18378	0	24221	12877	55476
S.D.P. + VENTILATIVE COOLING	2050	25.2	39.3	17.0	5.4	64.5	15008	0	23859	15468	54335
	2090	29.7	37.9	11.3	14.4	67.7	17694	0	24228	12340	54262
S.D.P. + STRATEGIE COMBinate	2050	24.7	40.3	19.5	3.7	65.0	14712	0	23723	16858	55293
	2090	28.4	38.5	13.5	11.8	66.9	1869	0	24027	13563	39459

	KPI Impianti	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	19.4	17.1	11.3
	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	4.1	6.1	14.1
	EP _{t,tot} [kWh/m ² anno]	67.2	66.6	69.4
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	15851	15896	18505
1. Schermature solari	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+10% 18.8	+12% 12.7
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-25% 4.6	-15% 12.6
	EP _{t,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	0% 66.6	-2% 68.2
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	-2% 15587	-4% 17703
2. Sup. alta riflettanza	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+6% 18.1	+8% 12.3
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-8% 5.6	-5% 14.1
	EP _{t,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+1% 67.1	+0.2% 69.5
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	+0.2% 15933	-0.7% 18378
3. Ventilative cooling	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-0.5% 17.0	0% 11.3
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-11% 5.4	-3% 14.4
	EP _{t,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-3% 64.5	-2% 67.7
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	-6% 15008	-4% 17694
4. Soluzione 1+2+3	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+14% 19.5	+19% 13.5
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-39% 3.7	-20% 11.8
	EP _{t,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-2% 65.0	-4% 66.9
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	-7% 14712	+1% 18691

Figura 40:

Tabella comparativa delle strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto e percentuale, dei KPI rispetto allo stato di progetto, riferita allo stesso anno.

aumenta dall'altro lato di un pò l'energia per riscaldare, a causa delle motivazioni citate all'interno del paragrafo precedente. inoltre, il **ventilative cooling**, come in precedenza, si conferma l'unica startegia che non incrementa l'energia necessaria per il riscaldamento.

Prendendo in esame l'energia primaria totale, si può dire come in generale gli scostamenti dei diversi valori non siano così elevati, ma per la quasi totalità delle soluzioni l'energia totale richiesta diminuisce fino ad arrivare ad un 4% nella soluzione combinata all'anno 2090. Per il modello con le pareti verticali ad alta riflettanza si constata invece un leggero aumento di questo indicatore, con percentuali però che raggiungono malapena l'1%.

Infine, per quanto riguarda l'energia elettrica consegnata al generatore l'anda

mento segue in maniera quasi del tutto aderente quello dell'energia primaria totale, con un leggero aumento del miglioramento delle percentuali.

La tabella riportata in **Figura 41**, nella pagina successiva, confronta le differenti strategie di intervento con il modello allo stato di progetto riferito al 2010. Come per i risultati lato fabbricato anche in questo caso la situaione viene completamente ribaltata rispetto alla tabella di **Figura 40**, infatti si può vedere come tutte le soluzioni risultano essere resilienti per quanto riguarda l'energia primaria totale necessaria per il riscaldamento dell'edificio, questo anche grazie all'aumento progressivo delle temperature con il passare degli anni.

L'energia primaria necessaria per il raffrescamento, al contrario, mostra una chiara

endenza all'incremento al progredire del cambiamento climatico, raggiungendo entro il 2090 valori superiori al 200% rispetto allo stato attuale. Nonostante tali aumenti, le diverse strategie analizzate non determinano mai un fabbisogno superiore a quello del modello di riferimento privo di interventi, evidenziando quindi una capacità, seppur limitata, di mitigare gli effetti del surriscaldamento estivo.

Tale comportamento presenta un'unica eccezione nel caso del modello che combina tutte le strategie, il quale al 2050 riesce a ridurre l'energia primaria richiesta per il raffrescamento al di sotto del livello del 2010, risultando quindi resiliente; tuttavia, questa condizione non si mantiene al 2090, anno in cui si osserva nuovamente un incremento significativo, pari al 188%, che ne compromette la capacità di adattamento nel

lungo periodo.

Se si considera invece l'energia primaria totale, emerge un quadro più articolato e in parte più favorevole: non solo il modello con strategie combinate manifesta condizioni di resilienza al cambiamento climatico, ma tale comportamento si riscontra anche in tutte le altre configurazioni modellate per lo scenario al 2050. Inoltre, seppur con un margine estremamente ridotto, tale da mantenere pressoché invariato il fabbisogno complessivo, anche il modello con tutte le strategie integrate riesce a conservare un livello di energia primaria totale analogo allo stato di progetto nell'anno 2010, mostrando quindi una resilienza marginale ma comunque presente.

L'energia elettrica consegnata al generatore segue, in modo coerente, l'andamento osservato per

Figura 41:
Tabella comparativa delle strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto e percentuale, dei KPI rispetto allo stato di progetto all'anno.

KPI Impianti		TM	2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	19.4	-12%	17.1	-42% 11.3
	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	4.1	+48%	6.1	+260% 14.1
	EP _{T,tot} [kWh/m ² anno]	67.2	-0.9%	66.6	+3% 69.4
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	15851	0%	15896	+17% 18505
1. Schermature solari	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-3%	18.8	-35% 12.7
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+12%	4.6	+206% 12.6
	EP _{T,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-1%	66.6	+2% 68.2
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	-2%	15587	+12% 17703
2. Sup. alta riflettanza	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-7%	18.1	-37% 12.3
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+36%	5.6	+242% 14.1
	EP _{T,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-0.2%	67.1	+3% 69.5
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	+1%	15933	+16% 18378
3. Ventilative cooling	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-13%	17.0	-42% 11.3
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	+31%	5.4	+251% 14.4
	EP _{T,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-4%	64.5	+0.7% 67.7
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	-5%	15008	+12% 17694
4. Soluzione 1+2+3	EP _{C,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	0%	19.5	-31% 13.5
	EP _{H,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-10%	3.7	+188% 11.8
	EP _{T,tot} [kWh/m ² anno]	[-]	-3%	65.0	-0.5% 66.9
	Q _{del} [kWh] (E.Elettrica)	[-]	-7%	14712	+18% 18691

l'energia primaria totale, replicandone le variazioni e confermando così la stretta correlazione tra prestazioni dell'involucro, strategie di mitigazione e risposta dell'impianto alle mutevoli condizioni climatiche future.

Per rendere più chiari i risultati discussi in precedenza, sono stati elaborati due istogrammi: uno riferito all'anno 2050 (**Figura 42**) e uno all'anno 2090 (**Figura 43**), nei quali tutte le strategie analizzate vengono confrontate con lo stato di progetto del 2010. Dall'osservazione dei grafici emerge che, al 2090, a causa degli effetti del cambiamento climatico, l'intero insieme dei valori risulta traslato verso sinistra (lato raffrescamento) rispetto allo scenario del 2050.

Le linee rosse riportate negli istogrammi rappresentano l'intervallo di valori raggiunti dalla domanda di energia primaria dello stato di progetto al 2010, consentendo un confronto immediato e più efficace tra le diverse soluzioni. Sulla base di questo riferimento grafico, si può osservare che, per il 2050, sia lo stato di progetto sia le strategie di

schermatura, **ventilative cooling** e la soluzione combinata mostrano una riduzione della richiesta di energia primaria rispetto al 2010, indicando un certo grado di resilienza ai cambiamenti climatici. Tale comportamento rispecchia quanto già evidenziato in precedenza per la domanda totale di energia primaria.

Al contrario, nello scenario all'anno 2090 la barra rossa evidenzia come nessuna delle strategie considerate risulti resiliente: in tutti i casi, infatti, la domanda cumulata di energia per riscaldamento e raffrescamento supera il valore di riferimento del 2010. Questo risultato conferma una perdita generale di efficacia delle soluzioni analizzate nel lungo termine, in presenza di condizioni climatiche mutate e più estreme.

ENERGIA PRIMARIA AL 2050

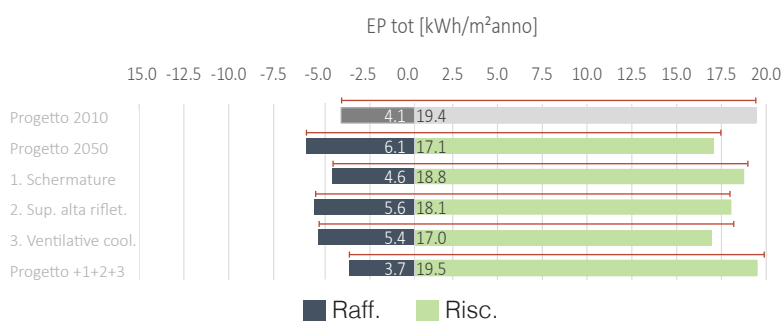


Figura 42:

Istogramma comparativo delle diverse strategie al 2050 rispetto allo stato di progetto al 2010, con l'indicazione dell'energia primaria per riscaldamento e raffrescamento e una barra rossa per comparare ogni soluzione con il 2010.

ENERGIA PRIMARIA AL 2090

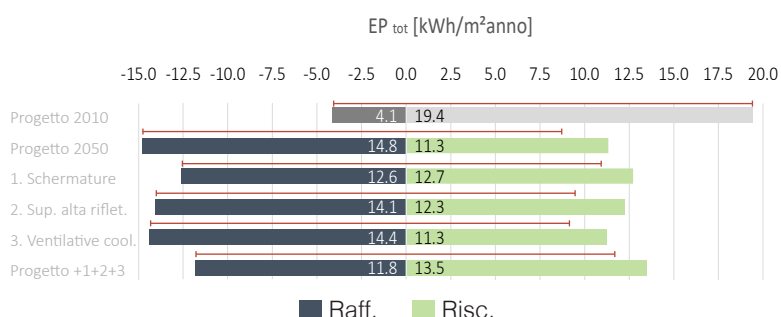


Figura 43:

Istogramma comparativo delle diverse strategie al 2090 rispetto allo stato di progetto al 2010, con l'indicazione dell'energia primaria per riscaldamento e raffrescamento e una barra rossa per comparare ogni soluzione con il 2010.

L'analisi comparata dei grafici relativi all'energia primaria totale (EPgl) e delle sue componenti rinnovabile (ren) e non rinnovabile (nren) mostra un comportamento coerente con quanto già osservato. Lo scenario al 2050 evidenzia un primo effetto positivo delle strategie applicate, infatti tutte le configurazioni presentano infatti una lieve riduzione della componente non rinnovabile rispetto allo stato di progetto 2010; questo effetto è maggiormente pronunciato nella soluzione con **ventilative cooling** e nella strategia combinata, dove la riduzione della domanda di energia primaria coincide con un miglior utilizzo dei flussi termici gratuiti e una minore necessità di energia meccanica per il raffrescamento.

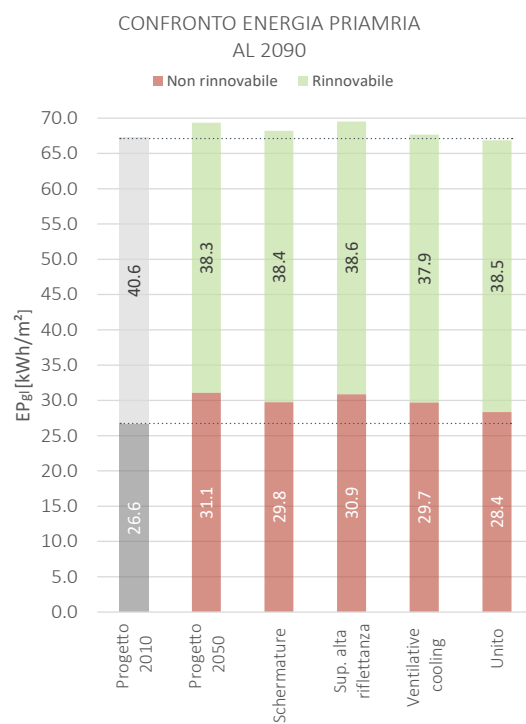
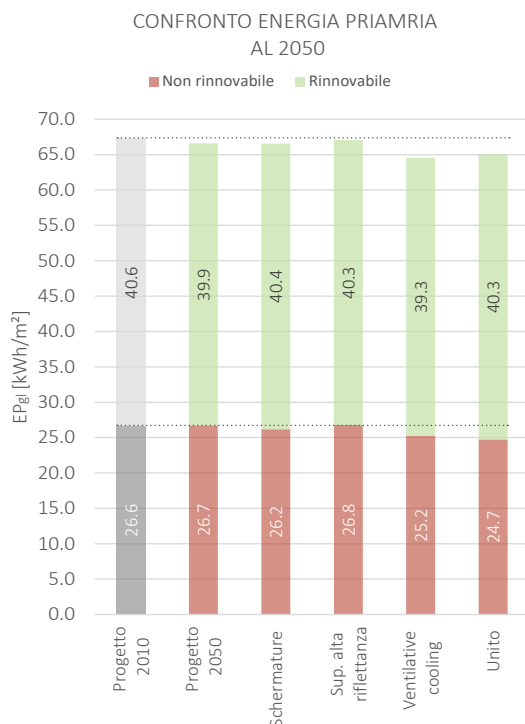
Figura 44 (sinistra):
Istogramma comparativo dell'energia primaria rinnovabile e non delle soluzioni al 2050.

Figura 45 (destra):
Istogramma comparativo dell'energia primaria rinnovabile e non delle soluzioni al 2090.

Anche la componente rinnovabile rimane stabile o leggermente ridotta, indicando

un complessivo contenimento della richiesta di energia. Nel complesso, lo scenario 2050 evidenzia una moderata resilienza energetica, con livelli di EPgl totali leggermente inferiori rispetto al 2010.

Nel 2090 la componente rinnovabile aumenta per tutte le soluzioni analizzate, con valori che risultano più elevati rispetto a quelli del 2010 e del 2050. Le strategie di mitigazione (schermature, superfici ad alta riflettanza, **ventilative cooling** e combinazione) riescono solo parzialmente a contenere questo aumento, e nessuna di esse consente di riportare il livello della non rinnovabile ai valori del 2010, segno che l'incremento della domanda complessiva di energia è determinato prevalentemente dal maggiore fabbisogno di raffrescamento tipico di un



clima nettamente più caldo.

Il comportamento divergente tra 2050 e 2090 sottolinea l'importanza di progettare edifici e strategie non solo per il medio periodo, dove gli effetti del clima mitigano alcuni fabbisogni, ma soprattutto per il lungo termine, quando l'aumento delle temperature estreme diventa dominante.

L'aumento della quota non rinnovabile nel 2090 indica una maggiore dipendenza da energia di origine fossile o comunque non compensata da fonti rinnovabili, peggiorando il profilo climatico dell'edificio. Sarà quindi necessario integrare ulteriori soluzioni avanzate, come sistemi passivi di alta efficienza, integrazione massiccia di rinnovabili e strategie di gestione dinamiche della radiazione solare.

Emissioni di anidride carbonica.

La valutazione delle emissioni climalteranti associate al sistema edificio-impianto rappresenta un ulteriore livello di approfondimento volto a comprendere in che misura le strategie resilienti adottate contribuiscano non solo al contenimento dei fabbisogni energetici, ma anche alla mitigazione degli impatti ambientali complessivi. Le emissioni di CO₂ vengono calcolate a partire dai consumi di energia primaria non rinnovabile, applicando i fattori di conversione previsti dalla normativa di riferimento, così

da ottenere un indicatore diretto dell'impronta carbonica delle diverse configurazioni analizzate.

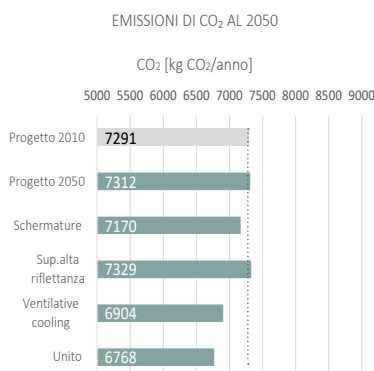


Figura 46:

Istogramma comparativo delle emissioni di anidride carbonica per le diverse strategie utilizzate all'anno 2050, con riferimento allo stato di progetto al 2010.

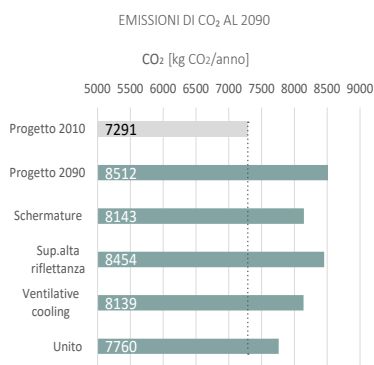


Figura 47:

Istogramma comparativo delle emissioni di anidride carbonica per le diverse strategie utilizzate all'anno 2090, con riferimento allo stato di progetto al 2010.

Per valutare quindi le emissioni di anidride carbonica equivalente vengono utilizzati sia gli istogrammi di **Figura 46** per il 2050 e di **Figura 47** per il 2090, che le tabelle comparative di **Figura 48** e **Figura 49** della pagina successiva.

Nel grafico relativo alle emissioni al 2050 emerge come quasi la totalità delle strategie analizzate garantiscano una riduzione delle emissioni annue di CO₂ rispetto allo stato di progetto del 2010 (7 291 kg CO₂/anno). Le diminuzioni risultano più evidenti nelle soluzioni di schermature, **ventilative cooling** e nel modello con tutte le strategie unite, che si

Figura 48:

Tabella comparativa delle strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto e percentuale, delle emissioni di anidride carbonica rispetto allo stato di progetto, riferita allo stesso anno di riferimento.

	KPI Ambientale	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	CO ₂ [kg/anno]	7291	7312	8512
1. Schermature solari	CO ₂ [kg/anno]	[-]	-2% 7170	-4% 8143
2. Sup. alta riflettanza	CO ₂ [kg/anno]	[-]	+0.2% 7329	-0.7% 8454
3. Ventilative cooling	CO ₂ [kg/anno]	[-]	-6% 6904	-4% 8139
4. Soluzione 1+2+3	CO ₂ [kg/anno]	[-]	-7% 6768	-9% 7760

possono definire resilienti ai cambiamenti climatici secondo i termini e le condizioni descritte in questo elaborato di tesi. Il quadro generale suggerisce che, a metà secolo, l'incremento delle temperature esterne non comporta ancora un aggravio significativo sul fabbisogno energetico estivo tale da annullare gli effetti delle soluzioni adottate.

La situazione cambia in modo sostanziale nello scenario climatico 2090, dove le emissioni associate allo stato di progetto 2090 aumentano fino a 8.512 kg CO₂/anno, rappresentando un incremento di circa il 17% rispetto al 2010. Le strategie analizzate riducono in parte questo aumento, ma nessuna riesce a riportare le emissioni ai livelli del 2010 o del 2050.

La strategia che combina tutte le soluzioni anche al

2090 risulta essere la più efficace nonostante non riesca a definirsi resiliente ai cambiamenti climatici.

Questo risultato è coerente con quanto osservato anche per l'energia primaria negli scenari futuri più spinti: l'aumento delle temperature esterne e degli eventi climatici estremi determina un forte incremento del fabbisogno di raffrescamento, che non può essere compensato dalle strategie adottate. Ne risulta una progressiva perdita di resilienza: ciò che nel 2050 risultava ancora efficace smette di esserlo nel clima estremo del 2090. Viene evidenziato inoltre in tutte le variabili prese in considerazione fino ad ora che le superfici ad alta riflettanza solare in questo caso le chiusure verticali, risultano essere l'intervento che meno giova all'obiettivo di resilienza, focus di questa analisi.

Figura 49:

Tabella comparativa delle strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto e percentuale, delle emissioni di anidride carbonica rispetto allo stato di progetto all'anno 2010.

	KPI Ambientale	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	CO ₂ [kg/anno]	7291	+0.3% 7312	+17% 8512
1. Schermature solari	CO ₂ [kg/anno]	[-]	-1.7% 7170	+12% 8143
2. Sup. alta riflettanza	CO ₂ [kg/anno]	[-]	+0.5% 7329	+16% 8454
3. Ventilative cooling	CO ₂ [kg/anno]	[-]	-5% 6904	+12% 8139
4. Soluzione 1+2+3	CO ₂ [kg/anno]	[-]	-7% 6768	+6% 7760

Benessere termo-igrometrico

Per redigere l'analisi del benessere termo-igrometrico tutti i modelli energetici vengono testati ad impianto spento in modo che si possano valutare effettivamente le ore in cui un occupante sarebbe in una condizione di discomfort, inoltre non viene utilizzato il concetto di **comfort** statico ma di confort adattativo, descritto nella UNI EN 16798-1:2019 [76], ovvero un approccio alla valutazione del benessere termo-igrometrico che si basa sull'idea che le persone non siano passive rispetto all'ambiente termico, ma adottino comportamenti, abitudini e aggiustamenti per mantenere una condizione di **comfort** anche quando le condizioni interne si discostano dai valori ottimali definiti in modo statico.

Secondo questo modello, la temperatura interna accettabile non è fissa, ma dipende dalle condizioni climatiche esterne recenti e dalla possibilità degli occupanti

di compiere azioni adattive, come: aprire le finestre, modificare l'abbigliamento, regolare schermature solari, cambiare posizione all'interno dell'ambiente, utilizzare ventilatori o aumentare la ventilazione naturale. Il **comfort** tradizionale quindi si basa su parametri fissi, come il PMV/PPD di Fanger [77], e presuppone condizioni interne controllate tramite HVAC; il **comfort** adattativo, invece: considera la variabilità climatica esterna, riconosce la capacità di adattamento degli utenti e definisce un intervallo dinamico di temperature operative ammissibili.

Quindi, riassumendo, per questa ultima fase dell'analisi gli indicatori vengono calcolati ad impianto spento e sono:

- ore pesate di **discomfort** per il riscaldamento
- ore pesate di **discomfort** per raffrescamento

La tabella in **Figura 50** riporta questi valori per i mesi di Settembre, Luglio ed Agosto e per tutto l'anno.

Modello	Ore pesate di discomfort [°C h]				
	Settembre		Luglio-Agosto	Anno intero	
	WHD,H	WHD,c	WHD,c	WHD,H	WHD,c
S.D.F	0.1	21.9	52.9	7270.6	75.2
	23.6	47.0	72.1	5576.7	120.8
	0.1	98.8	167.1	4580.2	272.8
	0.0	429.2	768.8	2162.4	1250.2
S.D.P	0.0	0.0	0.1	1301.0	0.1
	0.0	2.1	23.3	800.1	25.5
	0.0	195.9	415.9	155.7	613.1
S.D.P. + SCHERMATURE	0.0	0.0	0.9	1396.6	0.9
	0.0	31.7	108.6	435.3	140.3
S.D.P. + SUPERFFICI ALTA RIFLETTANZA	0.0	0.1	7.7	1104.9	7.9
	0.0	136.7	298.7	312.9	435.5
S.D.P. + VENTILATIVE COOLING	0.0	0.0	0.6	795.8	0.6
	0.0	37.7	120.3	156.6	158.0
S.D.P. + STRATEGIE COMBinate	0.2	0.0	0.0	1804.4	0.0
	0.0	0.0	17.0	734.5	17.0

[76] Comitato Europeo di normazione (CEN), *EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings, Ventilation for buildings, Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, Brussels, 2019.

[77] il PMV (*Predicted Mean Vote*) stima la sensazione termica media su una scala da -3 a +3, mentre il PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) quantifica la percentuale prevista di insoddisfatti. Il modello integra variabili ambientali e personali, fornendo un riferimento fondamentale nella progettazione del **comfort** termoambientale.

Figura 50:
Tabella riassuntiva di tutti gli indicatori presi in esame, relativi al fabbricato del caso studio preso in esame.

Figura 51:

Tabella comparativa delle strategie, con l'indicazione della variazione, in valore assoluto delle ore pesate di discomfort rispetto allo stato di progetto, riferita allo stesso anno.

	KPI Confort	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	WHD _H [°Ch]	1301.0	800.1	155.7
	WHD _C [°Ch]	0.1	25.5	613.1
1. Schermature solari	WHD _H [°Ch]	[-]	1396.6	435.3
	WHD _C [°Ch]	[-]	0.9	140.3
2. Facciate fredde	WHD _H [°Ch]	[-]	1104.9	312.9
	WHD _C [°Ch]	[-]	7.9	435.5
3. Ventilative cooling	WHD _H [°Ch]	[-]	795.8	156.6
	WHD _C [°Ch]	[-]	0.6	158.0
4. Soluzione 1+2+3	WHD _H [°Ch]	[-]	1804.4	734.5
	WHD _C [°Ch]	[-]	0.0	17.0

Anche in questo, questi risultati si allineano perfettamente con quanto visto fino a questo punto, infatti:

- ogni soluzione, se si guarda la tabella di **Figura 51** migliora gli indici rispetto allo stesso anno tutto ciò che riguarda il raffrescamento, mentre peggiorano di poco sempre gli indici relativi al riscaldamento ad eccezione del **ventilative cooling**, che migliora il raffrescamento e lascia praticamente invariate le ore pesate di discomfort per il riscaldamento.

- al contrario, se viene effettuato il controllo con lo stato di progetto all'anno 2010, la situazione si ribalta e l'unico intervento resiliente solo dal punto di vista delle ore pesate di discomfort per il raffrescamento è la soluzione combinata all'anno 2050.

Si può notare come al 2090

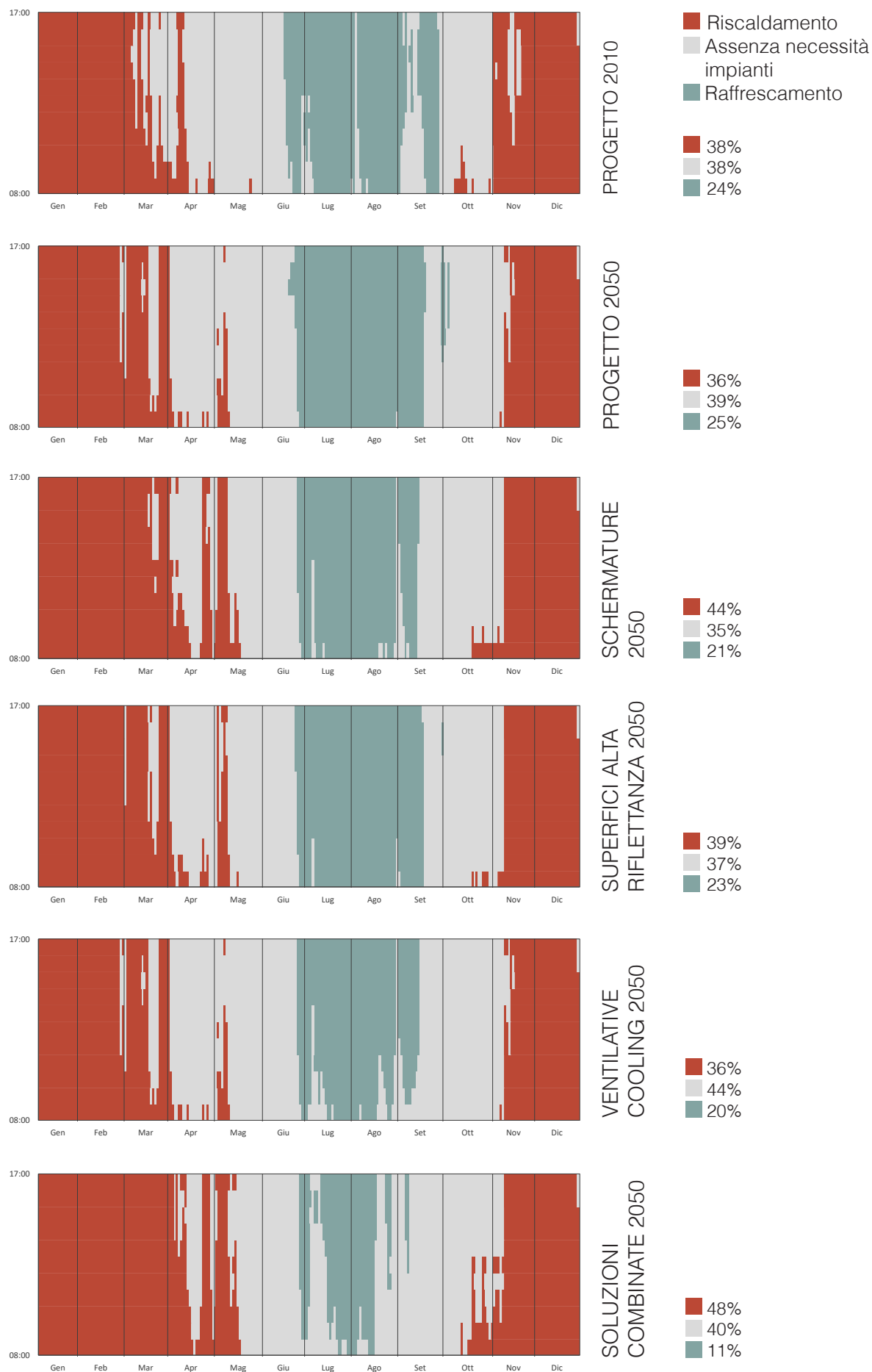
le ore pesate di **discomfort** per il riscaldamento tornano a scendere a causa del cambiamento climatico, mentre quelle per il raffrescamento sono superiori a quelle del 2010 ma con valori molto ridotti rispetto a quelli degli altri modelli.

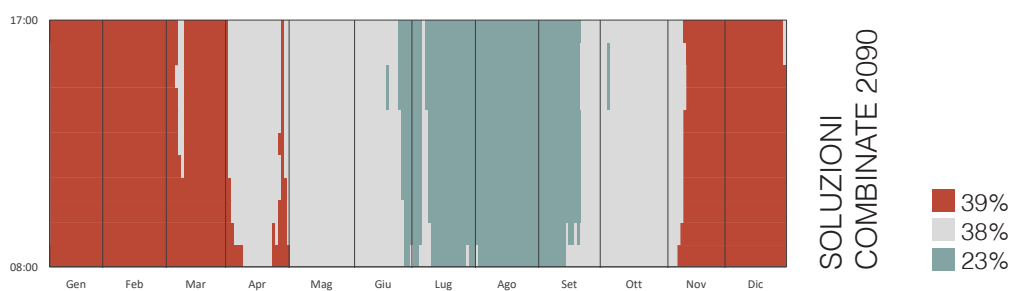
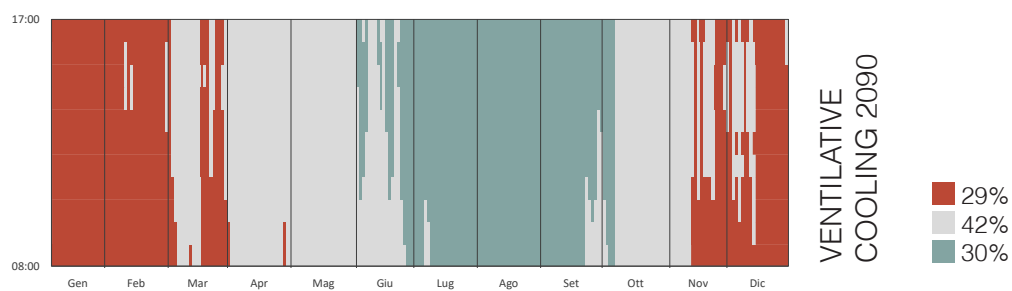
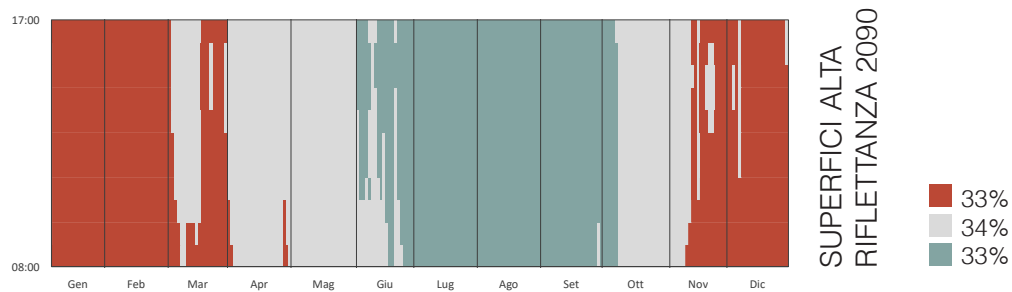
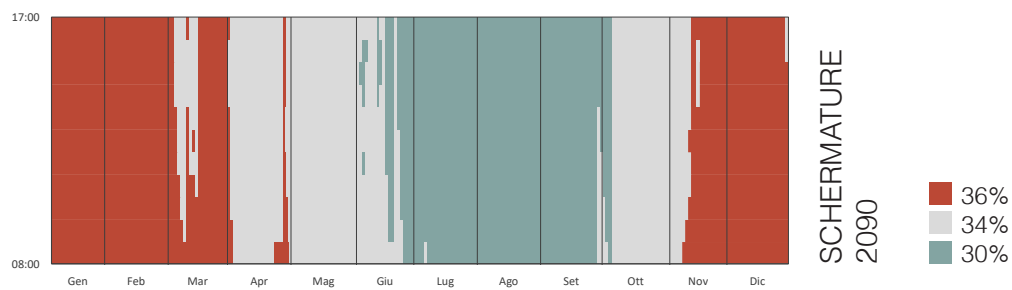
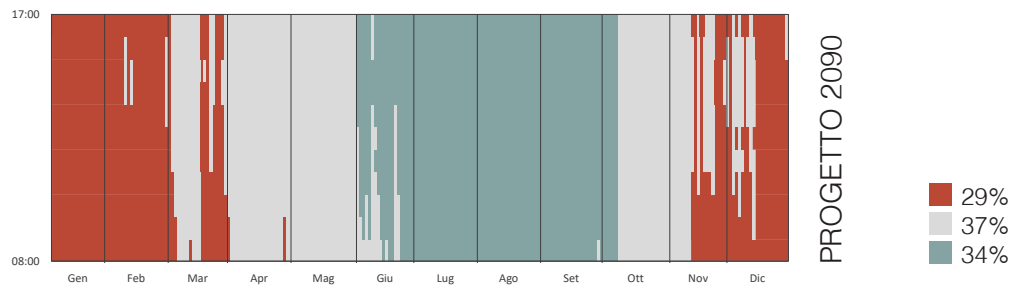
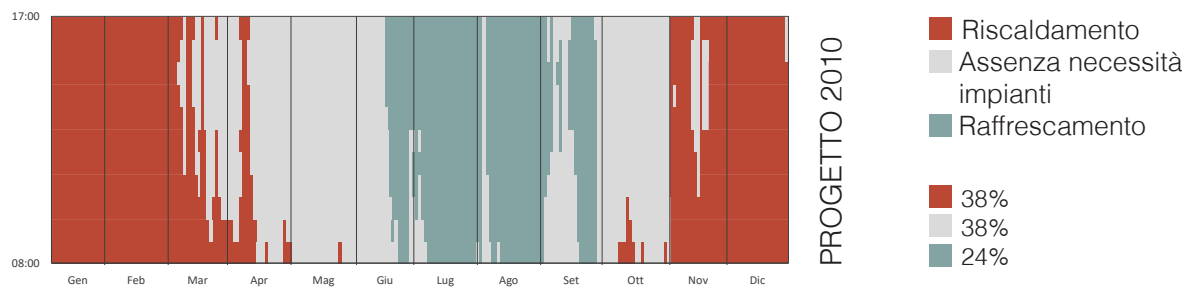
Come ultimo step, vengono realizzati dei grafici relativi alle ore di accensione degli impianti, (cioè, i periodi in cui la temperatura operativa interna esce dal range 20-26 °C, durante le ore di occupazione, dalle otto alle 17:00) per avere un'analisi più generale del comportamento di queste soluzioni. Questi grafici, forniscono infatti, una lettura quantitativa dell'efficacia delle strategie adottate sull'involucro edilizio e, di conseguenza, sul benessere termo-igrometrico degli occupanti: anche questi risultati confermano coerentemente quanto già osservato in precedenza.

Figura 52:

Tabella comparativa delle strategie, con l'indicazione della variazione in valore assoluto, delle ore pesate di discomfort, rispetto allo stato di progetto all'anno 2010.

	KPI Confort	TMY 2010	FTMY 2050	FTMY 2090
Stato di progetto	WHD _H [°Ch]	1301.0	800.1	155.7
	WHD _C [°Ch]	0.1	25.5	613.1
1. Schermature solari	WHD _H [°Ch]	[-]	1396.6	435.3
	WHD _C [°Ch]	[-]	0.9	140.3
2. Facciate fredde	WHD _H [°Ch]	[-]	1104.9	312.9
	WHD _C [°Ch]	[-]	7.9	435.5
3. Ventilative cooling	WHD _H [°Ch]	[-]	795.8	156.6
	WHD _C [°Ch]	[-]	0.6	158.0
4. Soluzione 1+2+3	WHD _H [°Ch]	[-]	1804.4	734.5
	WHD _C [°Ch]	[-]	0.0	17.0





CONCLUSIONI

La presente tesi ha approfondito il tema della resilienza climatica in ambito edilizio attraverso uno studio dettagliato applicato a un caso reale, ossia un edificio ad uso uffici situato in Piemonte, utilizzando come riferimento dati climatici futuri proiettati per gli anni 2050 e 2090 secondo lo scenario emissivo RCP 8.5 dell'IPCC. L'analisi si è concentrata sull'interazione tra involucro edilizio, sistemi impiantistici e strategie di intervento volte a mitigare gli effetti negativi del cambiamento climatico, valutando non solo la riduzione del fabbisogno energetico ma anche il benessere termo-igrometrico degli occupanti e l'impatto ambientale in termini di emissioni di anidride carbonica.

In primo luogo, è stata ribadita la centralità del concetto di resilienza, intesa come la capacità dell'edificio di mantenere o migliorare le proprie prestazioni energetiche nel lungo periodo nonostante l'evoluzione di condizioni climatiche avverse e sempre più estreme. Questo paradigma abbraccia sia la mitigazione delle cause dei cambiamenti climatici tramite la riduzione del fabbisogno energetico

e l'efficientamento impiantistico, sia l'adattamento agli effetti tramite strategie di controllo degli apporti solari, incrementi dell'inerzia termica e tecnologie innovative per la ventilazione e il raffrescamento passivo.

Il cuore operativo della ricerca è stata l'applicazione di modelli energetici dinamici, basati su calcolo orario secondo la norma UNI EN ISO 52016-1:2018. Attraverso il **software** EC700, sono stati ricostruiti lo stato di fatto dell'edificio e diversi scenari progettuali che integrano strategie di intervento innovative. L'approccio metodologico ha recepito l'integrazione di dati climatici futuri derivati da modelli di **downscaling** dinamico, garantendo un elevato livello di dettaglio e aderenza alle condizioni meteorologiche attese nel futuro. Tre strategie principali per testare la resilienza climatica sono state indagate singolarmente e in forma integrata:

1. Schermature solari avanzate: l'introduzione di schermature mobili o fisse esterne ha permesso di contenere significativamente l'ingresso di radiazione solare, riducendo i carichi termici estivi e migliorando

il *comfort* interno.

2. Superfici ad alta riflettanza solare: L'impiego di chiusure verticali rivestite con materiali ad elevata *solar reflectance* ha contribuito a ridurre la temperatura superficiale delle pareti, limitando la trasmissione del calore verso gli ambienti interni e mitigando l'effetto isola di calore urbano.

3. *Ventilative Cooling*: L'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata ha facilitato il raffreddamento passivo degli ambienti introducendo aria esterna a temperature più basse, migliorando l'efficienza del sistema edificio-impianto e aumentando il comfort termo-igrometrico degli occupanti.

L'integrazione multistrategica si è rivelata la soluzione più efficace, riuscendo a garantire un miglioramento complessivo delle prestazioni energetiche al 2050 che soddisfa il requisito di resilienza: mantenere il fabbisogno di raffrescamento al di sotto dei valori di progetto riferiti al 2010. Tuttavia, nel lungo termine (2090), nonostante gli interventi combinati, l'incremento marcato delle temperature esterne limita fortemente l'efficacia delle misure, non riuscendo a prevenire completamente l'aumento del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento.

L'analisi delle simulazioni energetiche ha permesso di approfondire la relazione tra involucro, impianti e

dati climatici futuri. Le simulazioni con impianti a potenza illimitata hanno evidenziato le potenzialità dell'involucro in termini di contenimento dei carichi termici, mentre l'introduzione della reale potenza di progetto ha mostrato le limitazioni operative degli impianti. La valutazione delle emissioni di CO₂ ha confermato come l'allineamento con le strategie di decarbonizzazione e l'incremento della quota di energia da fonti rinnovabili, in particolare fotovoltaico, rappresentino un contributo alla riduzione dell'impronta carbonica dell'edificio, anche se si può notare una riduzione delle emissioni solo all'anno 2050.

I risultati di questa tesi sottolineano l'importanza di un approccio progettuale integrato, che non si limiti a soddisfare requisiti normativi storico-centrici ma che consideri scenari climatici futuri e adotti strategie di adattamento e mitigazione resilienti. Si evidenzia la necessità di aggiornare i criteri prestazionali e normativi includendo dati climatici futuri, metodologie di modellazione dinamiche e indicatori di benessere qualificati a livello orario. Inoltre, si conferma la rilevanza delle certificazioni ambientali (LEED, BREEAM, ITACA) che stanno progressivamente incorporando elementi di resilienza climatica nei loro protocolli.

Sebbene il modello integrato multistrategico abbia dimostrato efficacia nel medio

termine, il peggioramento drastico delle condizioni climatiche attese per la fine del secolo impone un ripensamento delle strategie progettuali attuali. Sono necessari sviluppi tecnologici avanzati, nuovi materiali e sistemi impiantistici più performanti, e soprattutto un approccio olistico che consideri la resilienza a livello urbano e territoriale. Ulteriori studi dovranno includere la valutazione degli impatti di eventi climatici estremi, la gestione adattiva in tempo reale e l'integrazione con infrastrutture verdi.

In sintesi, la ricerca ha confermato che la resilienza climatica negli edifici è un obiettivo complesso e multidimensionale che richiede un equilibrio tra qualità dell'involucro, soluzioni passive e tecnologie impiantistiche, supportato da analisi accurate basate su dati climatici futuri. Per garantire edifici veramente resilienti è imprescindibile adottare un approccio progettuale evolutivo, che consideri la durabilità e l'adattabilità come parametri fondamentali, promuovendo un futuro sostenibile e competitivo per il settore edilizio.

BIBLIOGRAFIA

7.1 Legislazione

Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412: *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 242, 14 ottobre 1993.

Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF), *Guida operativa per il rispetto del principio di non arrecare danno significativo all'ambiente* (cd. DNSH, RGS / MASE, Roma, Allegata alla Circolare RGS n. 22 del 14 maggio 2024).

Ministero dell'Istruzione, Decreto Ministeriale 23 giugno 2022: *Modalità di redazione dell'elaborato finale per la formazione iniziale dei docenti*, Gazzetta Ufficiale n. 183 del 06/08/2022.

Ministero dello Sviluppo Economico, Decreto Ministeriale 26 giugno 2015: *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 162, 15/07/2015.

Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, Regolamento (UE) 2020/852 *relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 198, 22.06.2020, pag. 19.

7.1 Normativa tecnica

Comitato Europeo di normazione (CEN), EN 16798-1:2019 *Energy performance of buildings, Ventilation for buildings, Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, Brussels, 2019.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), UNI EN 15978:201 *Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici Metodo di calcolo*, Milano, 2011.

Ente Italiano di Unificazione (UNI), UNI 10349-1:2016 *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione energetica degli edifici e metodi per ripartire le grandezze climatiche in base alle condizioni mensili e orarie*, Milano, 2016.

Ente Italiano di Unificazione (UNI), UNI EN ISO 52016-1:2018 *Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, delle temperature interne e dei carichi di riscaldamento e raffrescamento - Parte 1: Modelli di calcolo*

dettagliati e semplificati, Milano, 2018.

Ente Italiano di Unificazione (UNI), UNI 11300-1:2019 *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva*, Milano, 2019.

7.1 Pubblicazioni scientifiche

Attia S., Levinson R., Rahif R., Zhang S., Miller W., et al., *Resilient Cooling Design Guidelines (Parts 1 & 2)*, International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities (EBC) Programme, Annex 80: Resilient Cooling of Buildings, REHVA & IEA-EBC, 2023.

Amin Moazami, Vahid M. Nik, Salvatore Carlucci, Stig Gevin, *"Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions"*, Applied Energy, Vol. 238, Elsevier, 2019.

Belcher, S.E., Hacker, J.N. e Powell, D.S., *Constructing design weather data for future climates*, Building Services Engineering Research and Technology, vol.26, n. 1, 2005.

BRE Global Ltd, *BREEAM International New Construction 2016: Technical Manual SD233*, Watford: Building Research Establishment, 2016.

Commissione Europea, *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities*, Brussels, Directorate-General for Research and Innovation, 2015.

Commissione Europea, *Piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile* (COM (2018) 97 final), Bruxelles, 8 marzo 2018.

Commissione Europea, *A Renovation Wave for Europe: Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives*, COM (2020) 662 final, 2020.

Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (Eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2014.

Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (AR5), *Quinto Rapporto di Valutazione*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Ginevra, Svizzera, 2014.

Haines-Young, R., & Potschin, M., *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure*, European Environment Agency, 2018.

IEA EBC Annex 80, *Resilient Cooling of Buildings - Definition, Targets and Potentials*, IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Vienna University of Technology, 2020.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*, Cambridge University Press, 2000.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) *Global warming of 1.5°C: An IPCC*

special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, 2018.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Sesto Rapporto di valutazione (AR6)*, Svizzera, Ginevra, 2022.

Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale (ITA-CA), *Protocollo ITACA: per la valutazione della qualità energetica e ambientale di un edificio*, Roma, 15 gen. 2004.

J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (a cura di), Climate Change: *The IPCC Scientific Assessment*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge, Cambridge University Press, 1990.

J. T. Houghton, B. A. Callander, S. K. Varney, (a cura di), *The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 1992.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), *Il principio DNSH e l'analisi dei rischi climatici nel PNRR – Vademecum per i soggetti attuatori delle misure MASE*, a cura della DG COGESPRO, Unità di Missione per il PNRR, 2024.

M. Switanek, D. Maraun, E. Bevacqua, *Stochastic downscaling of gridded precipitation to spatially coherent subgrid precipitation fields using a transformed Gaussian model*, International Journal of Climatology, vol.42, n.13, 2022.

Nicholas Dodd, Donatello Shane, and Mauro Cordella, *Level(s) – Un quadro di riferimento comune dell'UE per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio. Manuale utente 1: Introduzione al quadro comune Level(s) (versione 1.1)*, Commissione Europea, Centro Comune di Ricerca, gennaio 2021.

S. Rick Fedrizzi, Giacomo Morri, Angela Silvia Pavesi, Federico Soffietti, Elena Verani, *Uno strumento per la creazione di valore nella realizzazione di edifici sostenibili: la certificazione LEED*, Territorio Italia, 1(1), Articolo 3. DOI: 10.14609/Ti_1_14_3i.

Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, *Final report: recommendation of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*, Svizzera, giugno 2017.

United Nations, *Paris Agreement*, United Nations Framework Convention on Climate Change, Parigi, 2015.

United Nations, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, 2015.

Valeria Nesci, Ilaria Ballarini, Anna Ghirardi, Alice Gorrino, Luca Paduos, Simona Paduos, *La rendicontazione di sostenibilità aziendale in accordo con i regolamenti sulla Tassonomia UE*, 40° Convegno Nazionale AiCARR, 26 settembre 2024.

7.3 Sitografia

<https://www.globalreporting.org/about-gri/mission-history/> , consultato il 18 luglio 2025.

<https://cordex.org/> , consultato il 14 settembre 2025.

<https://annex80.iea-ebc.org/programme>, consultato il 10 ottobre 2025.

RINGRAZIAMENTI

In conclusione desidero ringraziare:

la Professoressa **Ilaria Ballarini**,
sia in qualità di relatrice sia come docente: ho sempre ammirato la professionalità e la precisione che contraddistinguono ogni suo lavoro. La ringrazio sinceramente per il supporto e i preziosi consigli che mi ha offerto lungo tutto il percorso.

Mamak Pourabdollahtootkaboni,
per il suo importante aiuto sugli argomenti più complessi e ostici di questo elaborato di tesi.

Giovanna De Luca
per essere stata il mio mentore costante durante questi mesi, per avermi aiutata a superare ogni difficoltà, per il suo impegno, la sua preparazione e tutte le energie che ha utilizzato per guidarmi.

Alice Gorrino
per il suo supporto sotto ogni punto di vista, per le sue competenze, per l'aiuto nello scandire il flusso di lavoro e per il suo modo di vedere la vita.

l'azienda **Edilclima S.r.l.**
per avermi offerto l'opportunità di svolgere sia il tirocinio che la tesi con loro, permettendomi di ampliare il mio bagaglio di formazione. Grazie a tutte le belle persone che ho incontrato all'interno della ditta, in particolare vorrei ringraziare Giulio, Hilary, Arianna, Daniele e tutti coloro che mi hanno aiutata a reperire le informazioni necessarie per la modellazione energetica.

mia sorella **Azzurra**,
senza di te tutto quello che faccio avrebbe un sapore diverso, grazie per avermi sopportato e supportato in ogni pezzo di questo percorso, per esserci sempre me, per rendere la mia vita decisamente migliore.

mio **Papà**,
per tutti gli sforzi che fai e che hai fatto per me e per noi, per la tua sensibilità, il tuo amore e la tua forza. Sei stato, e continui a essere, il mio esempio. Grazie per averci insegnato che nella vita tutto è possibile, che nessuna strada è davvero chiusa e per averci dato la possibilità e il coraggio di percorrerle tutte.

mia **Mamma**,
per la forza immensa che avevi e che ci hai trasmesso, per la tua luce infinita che ogni giorno non smette di scaldarci e guidarci, senza di te non sarei la persona che sono oggi. Ti voglio tanto bene.

Ziannet,

che più che una zia sei una seconda Mamma, grazie perchè so che posso dirti tutto, e tutti i problemi condivisi con te sono un pò più leggeri, grazie perchè ci sei sempre vicino e per tutto il bene che ci vuoi.

Filippo,

per il tuo modo di conoscermi e comprendermi così in profondità senza mai giudicare, per tutto il tempo meraviglioso condiviso insieme che non basta mai e per il tuo Amore.

infine, *Tutti* coloro che

hanno camminato accanto a me: le mie amiche Noe, Michi, Tec, Beu, Polez, Chia-
retta, Giulietta, Marci, Ary e Maty; i miei amici tutti, i miei parenti, tutto il persona-
le della Piscina, tutto lo staff del Buc e del Soul e tutti gli animatori. Grazie per esse-
re entrati nella mia vita, chi per qualche giorno, chi per molto tempo, chi da sempre.
Mi sono resa conto di quanto io sia fortunata ad avervi accanto e di quante persone mi
vogliano bene. Spero che ognuno di voi sappia ciò che ci lega a modo nostro e che, anche
senza bisogno di parole, vi arrivi sempre la grande quantità di bene che vi voglio.